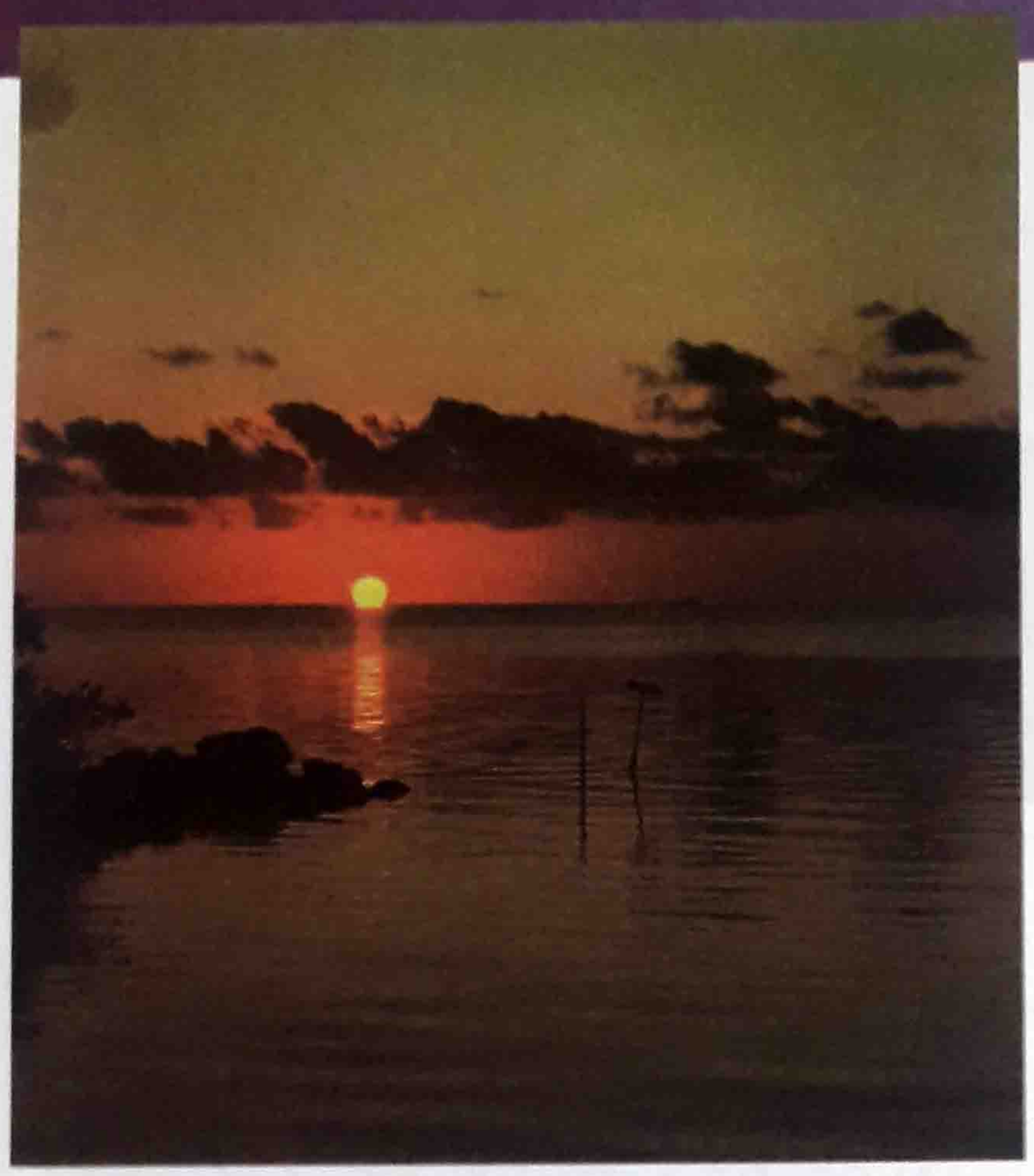
فصل ۲

خاستگاه و شیمی حیات



وجود منبع آب فراوان روی زمین، برای خاستگاه حیات ضروری بود.

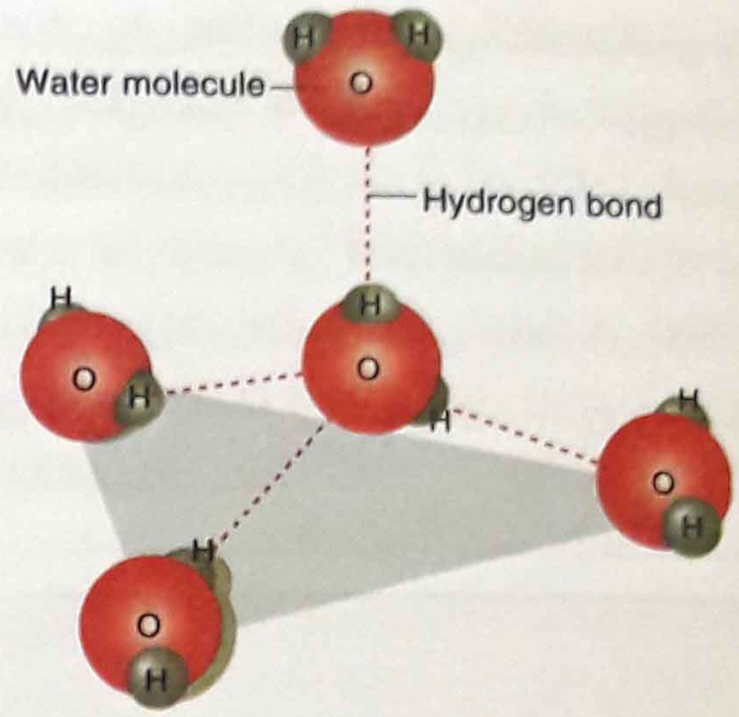
پیدایش خودبه‌خودی[1] حیات؟

از زمان‌های کهن مردم معمولاً تصور می‌کردند که حیات علاوه بر تولیدمثل والدینی به‌طور مکرر از طریق زایش خودبه‌خودی ماده‌ی غیرزنده به‌وجود می‌آید. به‌عنوان مثال، به نظر می‌رسید که قورباغه‌ها از هوای مرطوب، موش‌ها از ماده‌ی متعفن، حشرات از شبنم، و مگس از گوشت گندیده به وجود آمده‌اند. گرما، رطوبت، نور خورشید و حتی نور ستاره غالباً به عنوان فاکتورهایی درنظر گرفته می‌شدند که زایش خودبه‌خودی موجودات زنده را ترغیب می‌کنند.

در بین تلاش‌هایی که برای ساخت موجودات در آزمایشگاه شده است دستورالعمل ساخت موش است که توسط متخصص تغذیه گیاهی بلژیکی **جان باپتیست ون هلمونت**[2] در سال ۱۶۴۸ ارائه شد. "اگر شما تکه ای از زیرپوش آلوده به عرق تن را با مقداری گندم در ظرفی شیشه‌ای دهن باز بفشارید، پس از ۲۱ روز بوی آن تغییر کرده، مخمر گندم را به موش تغییر می‌دهد. اما آنچه که بیشتر جلب نظر می‌کند آن است که موش‌هایی که از گندم و زیرپوش به‌وجود می‌آیند، کوچک، حتی بالغ مینیاتوری یا سقط شده نبودند، بلکه موش‌های بالغ هستند!".

در سال ۱۸۶۱ دانشمند بزرگ فرانسوی لوئی پاستور[3] دانشمندان را مجاب کرد که موجودات زنده نمی‌توانند به‌طور خودبه‌خودی از ماده‌ی غیرزنده به‌وجود آمده باشند. در آزمایش‌های مشهور او، پاستور ماده‌ای قابل تخمیر را در داخل یک ظرف شیشه‌ای دارای گردن بلند و موجدار S- شکل قرار داد که در تماس با هوا بود. سپس فلاسک و محتوی آن را برای زمان طولانی جوشاند تا تمام موجودات ذره‌بینی موجود در آن کشته شوند. سپس فلاسک سرد شده، دست نخورده گذاشته شد. مشاهده شد که هیچ تخمیری اتفاق نیفتاده است زیرا تمام موجوداتی که از انتهای باز ظرف شیشه ای وارد شده بودند در گردن آن ته نشین شده و به ماده‌ی قابل تخمیر نرسیده بودند. وقتی گردن مواج ظرف شیشه‌ای برداشته شد موجودات ذره‌بینی هوا سریعاً وارد ماده‌ی قابل تخمیر شدند و تکثیر یافتند. پاستور نتیجه گرفت که حیات نمی‌تواند در غیاب موجودات ذره‌بینی از قبل موجود و عناصر مولد آن‌ها مانند تخم‌ها و اسپورها به وجود آمده باشد. با اعلام این نتایج به آکادمی فرانسه، پاستور اعلام کرد که «عقیده پیدایش خودبه‌خودی هرگز با این ضربه محلک به وجود نمی‌آید».

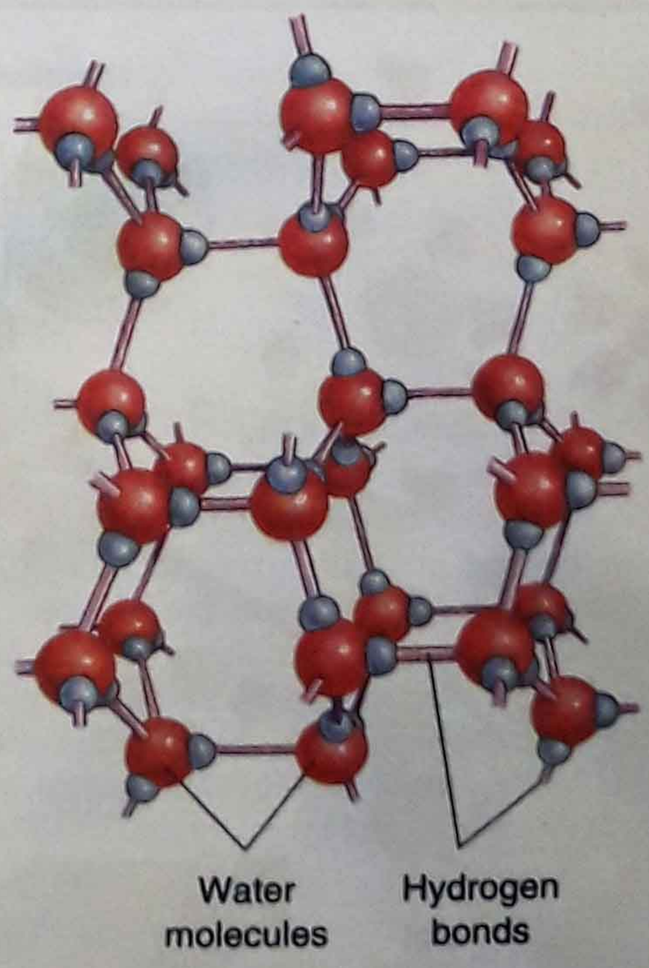
1- Spontaneous Generation
2- Jean Baptiste van Helmont
3- Louis Pasteur



شکل ۲-۲ شکل هندسی مولکول‌های آب. هر مولکول آب توسط پیوندهای هیدروژنی (خطوط نقطه چین) به چهار مولکول دیگر متصل شده است. همان‌طور که نشان داده شده اگر مولکول‌های آب با خطوط تخیلی به هم متصل شوند، یک چهار وجهی یا تتراهدرال به‌دست می‌آید.

موجودات زنده را از نوسان زیاد حرارتی حفاظت می‌کند. آب هم‌چنین دارای **گرمای تبخیر بالاست**، بیش از ۵۰۰ کالری لازم است تا ۱ گرم آب مایع را به بخار آب تبدیل کند. قبل از اینکه مولکول آب بتواند از سطح آب رها شده و وارد هوا شود، باید تمام پیوندهای هیدروژنی بین یک مولکول آب و همسایه‌های آن شکسته شود. برای حیوانات خشکی (و گیاهان)، سرمای حاصل از تبخیر آب برای آزاد شدن حرارت اضافی بدن مهم است.

خاصیت دیگر آب که برای حیات مهم است، **رفتار بی نظیر چگالی** آن طی تغییرات درجه حرارت است. بیشتر مایعات با کاهش درجه حرارت متراکم‌تر می‌شوند. حال آنکه آب در ۴ °C به حداکثر چگالی خود می‌رسد، **درحالی‌که هنوز مایع** است، سپس با سرد شدن بیشتر آب کمتر متراکم می‌شود (شکل ۳-۲). بنابراین یخ شناور می‌ماند تا اینکه به ته رودخانه‌ها و



شکل ۳-۲ *وقتی آب در صفر درجه سانتی‌گراد* یخ می‌زند، چهار بار جزئی هر اتم در مولکول با بارهای متضاد اتم‌ها در مولکول‌های دیگر آب برهم‌کنش می‌دهند. پیوندهای هیدروژنی بین تمام مولکول‌ها، ساختمانی مشبک شبه – کریستالی را تشکیل می‌دهند و مولکول‌ها نسبت به حالتی که برخی از مولکول‌های آب در ۴ °C درگیر پیوند هیدروژنی نیستند، از یکدیگر بیشتر دور (و بنابراین کمتر متراکم) هستند.

شکل ۴-۲ به خاطر پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب در سطح تماس آب – هوا، مولکول‌های آب به یکدیگر چسبیده‌اند و کشش سطحی زیادی را به‌وجود می‌آورند. بنابراین حشراتی، مانند این سن آب‌سوار، می‌تواند واقعاً بر روی آب قدم بزند.

آبگیرها فرو رود. اگر یخ متراکم‌تر از آب مایع می‌بود، توده‌های آب در زمستان از پایین به بالا یخ می‌زدند و ممکن نبود در تابستان کاملاً ذوب شوند. چنین شرایطی زندگی در آب را به شدت محدود می‌کرد. در یخ مولکول‌های آب شبکه‌ای گسترده و باز شبه‌کریستالی محکم توسط پیوندهای هیدروژنی را تشکیل می‌دهند که مولکول‌های آن در مقایسه با آب مایع در ۴ °C کمتر متراکم هستند.

آب دارای **کشش سطحی بالایی**، بیش از کشش سطحی سایر مایعات به استثناء جیوه است. پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب یک چسبندگی مهم را برای حفظ شکل پروتوپلاسم و حرکت ایجاد می‌کند. کشش سطحی حاصل، یک **پردازه** بوم‌شناختی برای حشراتی مانند آب‌سوارها[1] و سوسک‌های فرفره‌ای[2] که بر روی سطوح آبگیرها اسکیت می‌کنند به وجود می‌آورد (شکل ۴-۲). علی‌رغم کشش سطحی بالا، آب دارای چسبندگی **کم** است و حرکت خون را در مویرگ‌های ریز و حرکت سیتوپلاسم را درون مرزهای یاخته‌ای مجاز می‌کند.

آب یک **حلال** عالی است. نمک‌ها بیشتر از حلال‌های دیگر در آب حل می‌شوند. این خاصیت از طبیعت دوقطبی بودن آب ناشی می‌شود که باعث می‌شود مولکول‌های آب در اطراف ذرات باردار حل شده قرار گیرند. به عنوان مثال، وقتی کریستال NaCl در آب حل می‌شود، یون‌های Na^+ و Cl^- جدا می‌شوند (شکل ۵-۲). مناطق منفی دوقطبی‌های آب یون‌های Na^+ را جذب می‌کنند، درحالی‌که مناطق مثبت یون‌های Cl^- را جذب می‌کنند. این جهت‌گیری باعث می‌شود یون‌ها جدا شده و حلالیت آن‌ها را توسعه می‌دهد. حلال‌های فاقد این خاصیت دو قطبی کمتر در حفظ یون‌های جدا شده مؤثر هستند. اتصال آب به مولکول‌های پروتئینی حل‌شده، برای عملکرد صحیح خیلی از پروتئین‌ها ضروری است.

آب همچنین در خیلی از واکنش‌های شیمیائی در موجودات زنده شرکت می‌کند. بسیاری از ترکیبات با افزایش یک مولکول آب به قطعات کوچک‌تر شکسته می‌شوند، و این فرآیند، **هیدرولیز**[3] نامیده می‌شود. به علاوه

1- Water Strider
2- Whirligig Beetles
3- Hydrolysis

ترکیبات بزرگ‌تر ممکن است از اجزاء کوچک‌تر از طریق عکس هیدرولیز سنتز شوند که به **واکنش‌های تراکمی**[1] معروفند.

$$R — R + H_2O \xrightarrow{\text{هیدرولیز}} R — OH + H — R$$

$$R — OH + H — R \xrightarrow{\text{تراکمی}} R — R + H_2O$$

با توجه به اینکه آب برای حفظ حیات ضروری است، دنبالـه‌ی تحقیقـات در مورد حیات برون زمینی معمولاً با تحقیق بر روی آب شروع شد. طرح‌هـای مربوط به ایجاد پایگاه انسانی بر روی ماه وابسته به کشف آب در آنجا بـود. هم اکنون که ما در حال نوشتن این کتـاب هسـتیم، ناسـا[2] در حـال ارسـال ماهواره برای رصد گودال‌های مـاه و ردیـابی مـاهواره‌ای (LCROSS) آن برای جستجوی یخ است؛ هرگاه در قطب جنوب ماه یخ پیدا شـود، انتخـابی مناسب برای پایگاه انسان است.

pH محلول‌های آب

در آب مایع خالص (آب تقطیر شده)، کسر کوچکی از مولکول‌های آب به یون‌هـای هیدروژن (H^+) و هیدروکسـید (OH^-) شکسـته مـی‌شـوند و غلظـت هـر دو یـون 10^{-7} moles/lit است. وقتی یک ماده‌ی اسیدی در آب حل مـی‌شـود، یـون‌هـای H^+ در محلول پراکنده شده، بنابراین غلظت آن‌ها افزایش یافته و باعـث مـی‌شـود یون‌های H^+ بیش از مقدار یون‌های OH^- محلول شوند. یک محلول بازی به‌طـور عکس عمل می‌کند، یون‌های OH^- بـه محلـول کمـک کـرده و منجـر مـی‌شـود یون‌های OH^- فراوان‌تر از یون‌های H^+ شوند. میزان اسـیدی و بـازی بـودن یـک محلول برای بیشتر فرایندهای یاخته‌ای حیاتی اسـت و لازم اسـت بـه‌طـور دقیـق سنجیده و کنترل شود؛ به عنوان مثال ساختمان و عمـل پـروتئین‌هـای حـل شـده به‌طورجدی وابسته به غلظت H^+ در محلول است.

مقیاس **pH** میزان اسیدی یا بازی بودن یک محلول را تعیین می‌کند. مقیاس آن بین صـفر تـا ۱۴ اسـت و نمایـانگر عکـس لگـاریتم (پایـه‌ی ۱۰) غلظـت H^+ (برحسب moles/lit) است. بنـابراین آب مـایع خـالص دارای pH برابـر ۷ اسـت (غلظـت H^+ = 10^{-7} moles/lit). محلـولی بـا pH= ۶/۰ دارای غلظـت H^+، ۱۰ برابر بیشتر از آب خالص است و اسیدی اسـت، درحـالی‌کـه محلـولی بـا pH=۸/۰ دارای غلظت H^+، ۱۰ برابر کمتر از آب خالص است و بازی است. یک اسید قـوی غلیظ ماننـد اسـید هیـدروکلریک (HCl)، کـه بـه صـورت تجـاری بـه نـام اسـید میوریاتیک شناخته شده و برای تمیز کردن ساختمان استفاده می‌شود، دارای غلظت هیدروژن 10^0 mole/liter=1~ است که pH صفر دارد (غلظت H^+ ۱۰۰۰۰۰۰۰ مرتبه بیش از آب خالص است). یـک بـاز قـوی غلـیظ ماننـد هیدروکسـید سـدیم (NaOH، که به صورت تجاری در تمیز کننده‌های راه آب مایع استفاده مـی‌شـود) دارای غلظت H^+ تقریباً 10^{-14} moles/lit است که pH ۱۴ دارد.

بافر ماده‌ی حل شده‌ای است (حل شونده) که باعث می‌شود محلول بـه تغییـرات pH مقاوم شود، چون بافر می‌تواند یون‌های H^+ و OH^- اضافه شده را از طریق اتصال آن‌ها به ترکیبات از محلول بردارد. دی اکسید کربن حـل شـده بـه شـکل بیکربنـات (HCO_3^-) بافری است که کمک می‌کند تا خون انسان (pH=۷/۳-۷/۵) از تغییـرات pH محافظت شود. یون‌های H^+ در اثر واکنش با یون‌هـای بیکربنـات از محلـول برداشته شده و اسید کربنیک تشکیل می‌شود و اسیدکربنیک سپس به دی اکسـید کربن و آب تجزیه می‌شود. دی اکسید کربن اضافی در حین بازدم برداشته می‌شود. زمانی‌که عکس این واکنش عمل کند یون‌های OH^- اضافی با تشکیل بیکربنـات و یون‌های هیدروژن از محلول برداشته می‌شوند. یون‌های بیکربنات اضـافی بـه ادرار ترشح شده و یون‌های هیدروژن اضافی برای برگرداندن pH به سطوح نرمال مفید هستند. اگر pH خون کمتر از ۷ یا بیش از ۷/۸ شود منجر به بروز مشکلات شـدید سلامتی می‌گردد.

می‌کنند که توسط آن‌ها غذا هضم، جذب و متابولیزه می‌شود. آن‌ها سنتز مواد ساختمانی برای رشد را تحریک کرده و آن‌ها را جایگزین مواد ساختمانی می‌کنند که در اثر فرسوده شدن از بین رفته‌اند. آن‌ها آزادسازی انرژی مورد نیاز در تنفس، رشد، انقباض عضلانی، فعالیت‌های فیزیکی و فکری و خیلی از فعالیت‌های دیگر را تعیین می‌کنند. عملکرد آنزیم در فصل ۴ شرح داده شده است.

پریون[1] یک ذره‌ی پروتئینی عفونی است که در آن پروتئین موجود زنده میزبان به ساختمانی سه‌بعدی غیرعادی تا می‌خورد. پس از عفونی شدن، پریون موجب تاخوردگی مجدد کپی‌های طبیعی از پروتئین میزبان خود به شکل غیرعادی، با نتایج پاتولوژی، می‌شود. در بیماری جنون گاوی، آلودگی پریون به شدت به بافت‌های مغز آسیب می‌رساند و کشنده است. بیماری‌های عصبی کشنده ناشی از پریون‌های واگیردار در انسان (برای مثال Kuru)، گوسفند و بز (فلج گوسفندی = Scrapie) نیز اتفاق می‌افتد.

اسیدهای نوکلئیک

اسیدهای نوکلئیک مولکول‌های پلیمری پیچیده‌ای هستند که توالی بازهای نیتروژنی آن‌ها اطلاعات ژنتیکی مورد نیاز برای توارث زیست شناختی را رمزدهی می‌کنند. آن‌ها دستورات سنتز آنزیم‌ها و سایر پروتئین‌ها را ذخیره کرده و تنها مولکول‌هایی هستند که می‌توانند (با کمک آنزیم‌های اختصاصی) خودشان را همانندسازی کنند. دو نوع اسید نوکلئیک در یاخته‌ها عبارتند از **دزوکسی ریبونوکلئیک اسید (DNA)** و **ریبونوکلئیک اسید (RNA)**. آن‌ها پلیمرهایی از واحدهای تکراری به نام **نوکلئوتیدها** هستند، هر یک دارای یک قند، یک باز ازتی و یک گروه فسفات می‌باشند. علاوه بر نقش آن‌ها در اسیدهای نوکلئیک، نوکلئوتیدها دارای نقش مهمی به عنوان ناقلین انرژی شیمیایی در سوخت و ساز یاخته‌ای هستند. چون ساختمان اسیدهای نوکلئیک برای سازوکار توراث و ساختن پروتئین حیاتی است، اطلاعات بر روی اسیدهای نوکلئیک به تفصیل در فصل ۵ آورده شده است.

تکامل شیمیایی

هالدین و اپارین پیشنهاد کردند که جو آغازین زمین از ترکیبات ساده مانند آب، هیدروژن مولکولی، متان و آمونیاک تشکیل شده، ولی فاقد گاز اکسیژن (O_2 اکسیژن مولکولی نیز نامیده می‌شود) بود. طبیعت اولیه جو برای درک خاستگاه حیات ضروری است. ترکیبات آلی که موجودات زنده را تشکیل می‌دهند که نه در خارج یاخته‌ها سنتز می‌شوند، نه در حضور اکسیژن مولکولی که به فراوانی در جو امروزه وجود دارد، پایدار هستند. اگرچه بهترین مشاهدات نشان می‌دهد که جو آغازین دارای مقدار ناچیزی از اکسیژن مولکولی بوده است. بنابراین جو اولیه یک جو احیاگر بوده، به‌طور عمده متشکل از مولکول‌هایی که در آن‌ها هیدروژن بیش از اکسیژن است. ترکیبات کاملاً احیاگر به‌عنوان مثال متان (CH_4) و آمونیاک (NH_3) را تشکیل می‌دادند. چنین ترکیباتی "احیاءکننده" نامیده می‌شوند چون تمایل دارند الکترون را به سایر ترکیبات بدهند، و آن ترکیبات را احیاء کنند. در این موقع، زمین توسط سنگ‌های آسمانی بزرگ (قطر ۱۰۰ کیلومتر) و ستاره‌های دنباله‌دار بمباران شد و گرمای ایجاد شده به‌طور مکرر اقیانوس‌های زمین را تبخیر کرد.

این جو احیاگر قادر به ساخت ماده پیش زیستی[2] بود که منجر به آغاز حیات شد، گرچه برای موجودات زنده امروزی کاملاً نامناسب بود. هالدین و اپارین چنین بیان کردند که تابش پرتو فرابنفش به مخلوط گازی منجر به تشکیل مواد آلی زیادی مانند قندها و اسیدهای آمینه شد. هالدین پیشنهاد کرد که مولکول‌های آلی اولیه در اقیانوس‌های آغازین تجمع یافته تا آنکه یک سوپ رقیق داغ تشکیل شد. در این اشکنه[3] (سوپ) بسیار قدیمی کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌توانند انباشته شوند و اولین ساختمان‌های قادر به هدایت همانندسازی خودشان را تشکیل دهند.

هرگاه ترکیبات ساده گازی موجود در جو اولیه زمین با متان و آمونیاک در سازگان شیشه‌ای سر بسته‌ای مخلوط شوند، در دمای اتاق هرگز واکنش شیمیایی با یکدیگر نشان نمی‌دهند. برای انجام یک واکنش شیمیایی، به منبع پیوسته **انرژی آزاد** و کافی جهت غلبه بر سدهای فعال‌سازی واکنش‌ها نیاز است. نور فرابنفش خورشید باید قبل از انباشته شدن اکسیژن جو روی زمین زیاد بوده باشد؛ ازون که یک شکل سه اتمی از اکسیژن است، به میزان زیاد در جو وجود داشت، ولی در حال حاضر مانع از رسیدن قسمت اعظم پرتو فرابنفش به سطح زمین می‌شود. تخلیه‌های الکتریکی[4] می‌توانست انرژی بیشتری را برای تکامل شیمیایی فراهم سازد. اگرچه مقدار کل انرژی الکتریکی آزاد شده توسط آذرخش در مقایسه با انرژی خورشیدی کوچک است، تقریباً تمام انرژی آذرخش برای سنتز ترکیبات آلی در یک جو احیاگر کافی است. یک برق آذرخش از میان جو احیاگر مقدار زیادی از ماده آلی را تولید می‌کند. توفان‌های تُندری، ممکن است یکی از مهم‌ترین منابع انرژی لازم برای سنتز مواد آلی بوده باشند.

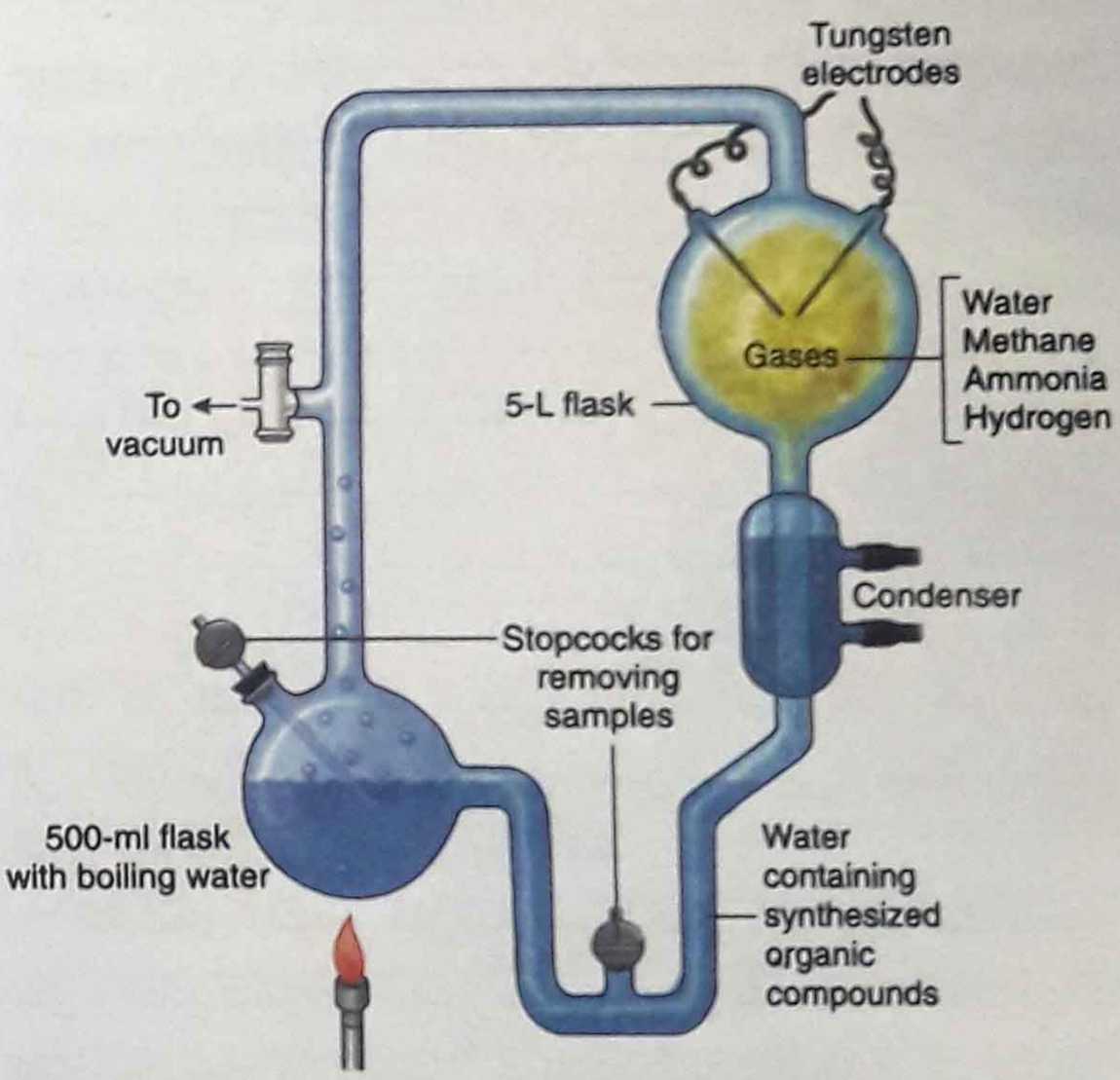
فعالیت‌های گسترده‌ی آتش‌فشانی منبع احتمالی دیگر انرژی است. به‌عنوان مثال بر اساس فرضیه‌ای، حیات از سطح زمین آغاز نشده بلکه از اعماق دریا یا اطراف چشمه‌های آب گرمایشی[5] شروع شده است. چشمه‌های آب گرمایش چشمه‌های گرم زیردریا هستند، آب دریا از میان شکاف‌های کف دریا نفوذ کرده تا این‌که به ماگمای داغ نزدیک می‌شود. سپس آب که حاوی مولکول‌های مختلف حل‌شده است بسیار داغ می‌شود و از تخته‌سنگ‌های بسیار داغ با فشار خارج می‌گردد. این مولکول‌ها شامل سولفید هیدروژن، متان، یون‌های آهن و یون‌های سولفید هستند. چشمه‌های آب گرمایش متعددی در موقعیت‌های مختلف اعماق دریا کشف شده‌اند و این چشمه هابه‌طور بسیار گسترده‌ای روی زمین وجود داشتند. امروزه بسیاری از باکتری‌های گرمادوست وگوگرد دوست به‌طور جالبی در چشمه‌های گرم رشد می‌کنند.

1- Prion

2- Prebiotic
3- Broth
4- Electrical Discharge
5- Hydrothermal Vents

سنتز پیش‌زیستی از مولکول‌های آلی کوچک

فرضیه **اُپارین- هالدین** آزمون تجربی که نشان دهد ترکیبات آلی ویژه‌ی حیات می‌توانند از مولکول‌های ساده‌تر موجود در محیط پیش حیاتی تشکیل شده باشند را برانگیخت. در سال ۱۹۵۳، **استنلی میلر**[1] **و هارلد اوری**[2] در شیکاگو شرایطی را با موفقیت نمایان کردند که معتقد بودند روی زمین آغازین وجود داشت. میلر دستگاهی را ساخت که به گونه‌ای طراحی شده بود تا مخلوطی از متان، هیدروژن، آمونیاک و آب را در کنار یک جرقه الکتریکی به گردش در آورد (شکل ۱۶-۲). آب درون شیشه پس از جوشش، بخار شده و بخار به گردش گازها کمک می‌کرد. محصولات تولید شده در تخلیه الکتریکی (به منزله‌ی آذرخش) در دستگاه تقطیر متراکم شده و در لوله‌ی U ـ شکل و شیشه‌ای کوچک (که به منزله‌ی اقیانوس است) جمع‌آوری می‌شدند.



شکل ۱۶-۲ دکتر استنلی میلر با یک کپی از دستگاه مورد استفاده در آزمایش خود در سال ۱۹۵۳ بر روی سنتز اسیدهای آمینه با یک آذرخش الکتریکی در یک جو قویاً احیائی.

پس از یک هفته جرقه‌ی متوالی، تقریباً ۱۵٪ کربن جو احیاگر به ترکیبات آلی تبدیل و در اقیانوس فرضی جمع‌آوری شد. بیشترین یافته چشمگیر این بود که بسیاری از ترکیبات مرتبط با حیات ساخته شدند. این ترکیبات شامل ۴ اسیدآمینه‌ای که به‌طور متداول در پروتئین‌ها یافت می‌شوند، اوره و چندین اسید چرب ساده بودند. ما می‌توانیم طبیعت حیرت‌انگیز این سیستم را درک کنیم، وقتی که در نظر بگیریم که هزاران ترکیب آلی شناخته شده با ساختمان‌هایی نه پیچیده‌تر از اسیدهای آمینه تشکیل شده وجود دارند. با این حال در سنتز میلر، بیشتر موادی که نسبتاً کم تشکیل شدند ترکیبات موجود در موجودات زنده بودند. چنین نتیجه‌ای یقیناً تصادفی نبود ولی به نظر می‌رسد که سنتز پیش زیستی بر روی زمین آغازین احتمالاً تحت شرایطی نه خیلی متفاوت از شرایط مصنوعی میلر اتفاق افتاده است.

آزمایش‌های میلر توسط افکار عمومی رایج که اظهار می‌داشتند جو اولیه روی زمین کاملاً متفاوت از جو مصنوعی و قویاً احیاگر میلر بود نقد شد. با وجود این کار میلر خیلی از محققین دیگر را تحریک کرد تا آزمایش او را تکرار کرده و بسط دهند. آن‌ها متوجه شدند در انواع بسیار متنوعی از مخلوط‌های گازی که با گرمای آتش‌فشانی، یا تحت تاثیر پرتو فرابنفش تابش خورشید گرم شده و یا در معرض تخلیه الکتریکی قرار گرفته بودند (آذرخش) اسیدهای آمینه سنتز شدند. تنها شرایط مورد نیاز برای تولید اسیدهای آمینه این بود که مخلوط گازی احیاگر باشد و به شدت در مجاورت یک منبع انرژی قرار گیرد. در سایر آزمایش‌ها، تخلیه‌های الکتریکی از میان مخلوط‌های منوکسیدکربن، ازت و آب عبور داده شدند و منجر به تولید اسیدهای آمینه و بازهای ازتی می‌شد. اگرچه، سرعت واکنش‌ها خیلی آهسته‌تر از سرعت واکنش در جوهای حاوی متان و آمونیاک بود و میزان محصولات در مقایسه کم‌تر بودند، این آزمایش ها این فرضیه را حمایت می‌کنند که آغازگرهای شیمیایی حیات می‌توانند در جوهایی اتفاق بیفتد که فقط به‌طور متوسط احیاگر هستند. نیاز به متان و آمونیاک موجب این تصور شد که ممکن است این مواد توسط سنگ‌های آسمانی و شهاب سنگ‌ها وارد زمین شده و یا در کنار چشمه‌های آب گرمایش سنتز شده باشند.

آزمایش‌های بسیاری دیگر از دانشمندان نشان داد که هرگاه مخلوط گازهای احیاگر در معرض یک منبع انرژی قوی قرار گیرند مولکول‌های حد واسط بسیار فعال مانند سیانید هیدروژن، فرمآلدئید و سیانواستیلن تشکیل می‌شوند. این مولکول‌ها با آب و آمونیاک یا ازت واکنش نشان می‌دهند تا آنکه مولکول‌های آلی پیچیده‌تر مانند اسیدهای آمینه، اسیدهای چرب، اوره، آلدئیدها، قندها و بازهای نیتروژنه (پورین‌ها و پیریمیدین‌ها) و کلیه بلوک‌های ساختمانی مورد نیاز برای سنتز پیچیده‌ترین ترکیبات آلی ماده حیات تشکیل شوند. شواهد بعدی نشان داد که سنتز طبیعی غیرزنده اسیدهای آمینه بر اساس یافته‌های حاصل از حضور اسیدهای آمینه در شهاب سنگ‌ها، مانند شهاب سنگ **مورچیسن** که در استرالیا در سال ۱۹۶۹ فرود آمد، ناشی شده است.

1- Stanley Miller
2- Harold Urey

تشکیل پلیمرها

مرحله‌ی بعد در تکامل شیمیائی شامل اتصال اسیدهای آمینه، بازهای ازته و قندها بود تا مولکول‌های بزرگ‌تر مانند پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک ساخته شوند. بیشتر پلیمریزاسیون‌ها شامل واکنش‌های تراکمی (دهیدراسیون) است و در این واکنش‌ها منومرها از طریق حذف آب به یکدیگر متصل می‌شوند. چنین سنتزی به آسانی در محلول‌های رقیق اتفاق نمی‌افتد، زیرا آب اضافی واکنش‌ها را به طرف تجزیه (هیدرولیز) سوق می‌دهد. در سازگان‌های زنده واکنش‌های تراکمی همیشه در محیط آبی (یاخته‌ای) و در مجاورت آنزیم‌های مناسب صورت می‌گیرد. بدون آنزیم و انرژی تأمین شده بوسیله ATP، ماکرومولکول‌های (پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک) سازگان‌های زنده بلافاصله به منومرهای تشکیل دهنده‌ی آن‌ها تجزیه می‌شوند.

قوی‌ترین فرضیه‌ی توجیه کننده تجمع پیش‌زیستی پلیمرهای مهم آن است که این مواد در مرزهای غشاءهای نیمه تراوای متشکل از مولکول‌های آمفی‌فیلیک کوچک، که دارای یک انتهای آب‌دوست و یک انتهای آب‌گریز هستند، اتفاق افتاده است. واکنش‌هایی که توسط سطوح فلزی یا معدنی کاتالیز می‌شوند، مولکول‌های آلی آمفی‌پاتیک را تولید می‌کنند. کار دیوید دیمر[1] و همکارانش نشان داد که این غشاءها می‌توانند از مخلوط‌های آبی آمفی‌فیل آلی به صورت خودکار تجمع یابند. این دانشمندان چنین فرض کردند که مواد برون زمینی که وارد زمین اولیه شده‌اند منبع مهم چنین ترکیباتی هستند که در شهاب سنگ‌ها مشترک هستند. آمفی‌فیل‌های استخراج شده از شهاب سنگ **مورچیسن**[2] در محلول‌های آبی، وزیکول‌های غشایی تشکیل می‌دهند (شکل ۱۷-۲). اسیدهای چرب و الکل‌های دارای زنجیر طویل که از اجزاء آمفی‌فیلیک غشاءهای زیست شناختی هستند در شهاب سنگ‌ها وجود دارند و تحت شرایط پیش‌زیستی مصنوعی ساخته می‌شوند. بنابراین از اجزاء محتمل غشاءهای پیش زیستی هستند.

در آب مایع، آمفی‌فیل‌های کوچک به‌طور خودبه‌خود از طریق برهمکنش‌های آب گریز به یکدیگر متصل شده و غشاءهای یک‌لایه و دولایه سازمان یافته به‌صورت وزیکول‌های توخالی را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۷-۲). غشاءهای نیمه حفاظتی این وزیکول‌ها باعث تغلیظ حل شونده در داخل وزیکول می‌شوند. لذا در شرایط آزمایشگاهی دهیدراسیون پلیمرها را از اسیدهای آمینه یا نوکلئوتیدها فراهم می‌کنند. چنین وزیکول‌هایی DNA دو رشته‌ای را پذیرفته و درون خود قرار می‌دهند.

کارهای اولیه **سیدنی فاکس**[3] نشان داد که پلی‌پپتیدها در محلول‌های آبی به‌طور خودبه‌خودی اجرام کروی کوچک را تشکیل می‌دهند و این اجسام کروی کوچک از نظر اندازه و شکل شبیه باکتری‌ها هستند و می‌توانند از طریق جوانه‌زدن تکثیر یابند. با این وجود دیمر و همکارانش

1- David Deamer
2- Murchison
3- Sidney Fox

شکل ۱۷-۲ میکروگرام الکترونی معرف اجسام ریزکروی شبه پروتئینی. این اجرام شبه پروتئینی می‌توانند در آزمایشگاه از پلی آمینواسیدها تشکیل شوند و احتمالاً نشانگر شکل‌های پیش یاخته‌ای هستند. آن اجسام دارای فراساختار داخلی مشخصی می‌باشند (۱۷۰۰ برابر بزرگ شده است).

استدلال می‌کنند که وزیکول‌های تشکیل شده از اسیدهای چرب با الکل‌هایی با زنجیر طویل مدل بهتری برای خاستگاه پیش یاخته‌ای از غشاءهای یاخته‌ای نسبت به اجرام کروی کوچک پروتئینی هستند. به‌نظر می‌رسد که اجرام کروی کوچک پروتئینی سد نیمه تراوای مورد نیاز را برای تغلیظ موثر اسیدهای‌آمینه و نوکلئوتیدها جهت پلیمریزه شدن فراهم نمی‌کنند. غشاءهای نیمه تراوای تشکیل شده از اسیدهای چرب و الکل‌های با زنجیر طویل باعث می‌شوند تا درون وزیکول مملو از اسیدهای آمینه و نوکلئوتیدها شوند. لذا این سنتز دهیدرات شدن پلی‌پپتیدها و اسیدهای نوکلئیک را تحریک می‌کند.

خاستگاه سازگان‌های زنده

نهشته‌های سنگواره‌ای نشان می‌دهد که حیات ۳/۸ میلیارد سال پیش وجود داشته است، بنابراین خاستگاه ابتدایی‌ترین شکل حیات می‌تواند به تقریب ۴ میلیارد سال پیش تخمین زده شود. اولین موجودات زنده یاخته‌های آغازین[4] بودند، واحدهایی با مرز غشایی خودمختار با سازمان‌دهی عملی پیچیده که فعالیت اساسی خودتکثیری را امکان پذیر می‌سازد. سیستم‌های شیمیایی آغازین که توضیح دادیم فاقد این خاصیت اساسی بودند. مسئله‌ی اصلی در درک خاستگاه حیات توضیح این نکته است که چگونه سازگان‌های شیمیایی آغازین توانستند به یاخته‌های زنده، خودمختار و خود تکثیر سازمان داده شوند.

همان‌طور که مشاهده کردیم، طی تکامل شیمیایی دراز مدت بر روی

4- Protocells

زمین آغازین، چندین جزء مولکولی از اشکال زنده تولید شد. سپس در مرحله‌ی بعدی تکامل، اسیدهای نوکلئیک (DNA و RNA) مانند سازگان‌های ژنتیکی ساده شروع به عمل نمودند که سنتز پروتئین‌ها به ویژه آنزیم‌ها را هدایت می‌کردند. اگرچه این نتیجه‌گیری باعث طرح معمای قدیمی و پردردسر تقدم پیدایش مرغ یا تخم‌مرغ شد: ۱) چگونه اسیدهای نوکلئیک می‌توانند بدون آنزیم‌هایی که سنتز آن‌ها را کاتالیز می‌کنند پدیدار شوند؟ ۲) چگونه آنزیم‌ها بدون اسیدهای نوکلئیک کدکننده‌ی توالی آمینواسیدی آن‌ها می‌توانند شکل بگیرند؟ این سؤالات از یک عقیده‌ی پذیرفته شده که فقط پروتئین‌ها می‌توانند به عنوان آنزیم‌ها عمل کنند ناشی شده است. مشاهدات ارائه شده‌ی توسط **استارتلینگ**[1] در ۱۹۸۰ نشان داد که RNA دارای فعالیت کاتالیزوری است.

RNA کاتالیتیک‌ها می‌توانند باعث پردازش RNA پیامبر (برداشت انترون‌ها) گردند و تشکیل پیوندهای پپتیدی را کاتالیز کنند. مشاهدات دقیق نشان می‌دهد که ترجمه‌ی mRNA توسط ریبوزوم‌ها از طریق RNA، نه محتوای پروتئینی آن‌ها کاتالیز می‌شود.

بنابراین نخستین آنزیم‌ها و نخستین مولکول‌های خود همانندساز می‌توانند RNA بوده باشند. در حال حاضر محققین این مرحله را «دنیای RNA» می‌نامند. دنیای RNA درساختارهای غشایی وزیکولی قرار می‌گیرند که احتمالاً شبیه آن‌هایی است که در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است. آزمایش‌های مرتبط با این فرضیه شامل تلاش‌هایی جهت تجمع یک سیستم ریبوزیم کارآمد درون یک وزیکول است. با این‌وجود، پروتئین‌ها به عنوان کاتالیزورها دارای چندین مزایای مهم نسبت به RNA می‌باشند و DNA ناقل اطلاعات ژنتیکی نسبت به RNA پایدارتر است. بنابراین نخستین یاخته‌های آغازین دارای آنزیم‌های پروتئینی و DNA بر یاخته‌های آغازین دارای RNA تنها به‌طور انتخابی ارجحیت یافتند.

به محض اینکه سازمانبندی حیات به مرحله پیدایش پیش‌یاخته‌ها رسید، انتخاب طبیعی بر این سازگان‌های آغازین خود همانندساز اعمال شد. این مرحله بحرانی بود. قبل از این مرحله، زیست‌زایی[2] از طریق شرایط مساعد محیطی بر روی زمین آغازین و توسط طبیعت خود عناصر واکنش دهنده شکل گرفت. وقتی که سازگان‌های خود همانندساز به انتخاب طبیعی پاسخ دادند، شروع به تکامل کردند. سازگان‌های با همانندسازی سریع‌تر و موفق‌تر ترجیح داده می‌شد درنتیجه به تدریج همتاهای موثر تکامل یافتند. سپس تکامل کد ژنتیکی و سنتز پروتئین کاملاً هدایت شده صورت گرفت. چنین سازگانی شرایط لازم را برای قرار گرفتن در موضع نیای مشترک تمام موجودات زنده برآورده می‌کند.

خاستگاه سوخت‌وساز

یاخته‌های زنده در حال حاضر، نظام سازمان یافته با توالی‌های پیچیده و بسیار منظم از واکنش‌ها با دخالت آنزیم ها هستند. چگونه چنین آرایش‌های متابولیکی بسیار پیچیده‌ای توسعه یافت؟ تاریخ واقعی این مرحله از تکامل زندگی ناشناخته است. در اینجا مدلی از ساده‌ترین توالی رویدادهایی را ارائه می‌کنیم که می‌تواند خاستگاه خواص متابولیکی موجود در سازگان‌های زنده را توضیح دهد.

موجودات زنده‌ای که می‌توانند غذای خودشان را از منابع معدنی با استفاده از نور یا منبع انرژی دیگری بسازند موجودات **تولیدکننده**[3] (کلمه یونانی: autos، خود +trophos، خوراک دهنده) نامیده می‌شوند (شکل ۱۸-۲). موجودات زنده فاقد این توانایی باید ذخایر غذایی خودشان را مستقیماً از محیط بدست بیاورند و موجودات زنده‌ی **مصرف کننده**[4] نامیده می‌شوند (کلمه یونانی: heteros ، دیگر + trophos خوراک دهنده). اولین موجودات زنده‌ی ذره‌بینی فرض شده گاهی اوقات موجودات **مصرف‌کننده اولیه**[5] نامیده می‌شوند زیرا برای غذای خود به منابع محیطی متکی بودند و قبل از تکامل موجودات زنده تولید کننده وجود داشته‌اند. این موجودات زنده احتمالاً موجودات زنده غیرهوازی مانند باکتری‌های جنس *Clostridium* بودند. چون تکامل شیمیائی ذخایر فراوان از مواد مغذی آلی در سوپ پیش زیستی را تأمین کرده، لازم نبوده است که اولین موجودات غذای خودشان را بسازند.

شکل ۱۸-۲ کوآلا، یک پستاندار مصرف کننده است که از درخت اوکالیپتوس (یک موجود غذاساز) تغذیه می‌کند. موجودات مصرف کننده برای تغذیه خودشان به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم وابسته به موجودات زنده‌ی غذاساز هستند که از انرژی خورشید برای سنتز مواد غذایی خود استفاده می‌کنند.

1-Startling
2- Biogenesis

3- Autotroph
4- Heterotroph
5- Primary heterotroph

موجودات زنده‌ی تولیدکننده نسبت به موجودات زنده‌ی مصرف کننده اولیه در نواحی که از مواد مغذی آلی تهی شده بودند، مزیت فوق‌العاده گزینشی داشتند. تکامل موجودات زنده تولید کننده به احتمال زیاد نیازمند کسب فعالیت‌های آنزیمی برای کاتالیز کردن تبدیل مولکول‌های معدنی به مولکول‌های پیچیده‌تر مانند کربوهیدرات‌ها بود. زمانی‌که یاخته‌ها شروع به مصرف پروتئین برای اعمال کاتالیزوری کردند، آنزیم‌های زیادی از سوخت‌وساز یاخته‌ای ظاهر شدند.

کارل وُسه[1] با این نظریه کلاسیک که بر اساس آن نخستین موجودات زنده غذاگیر بودند مخالفت کرده است. وی متوجه این فرض ساده‌تر شد که بر اساس آن مجموعه‌های مولکولی متصل شده به غشاء، نور مرئی خورشید را جذب کرده، با راندمان اندکی به انرژی شیمیائی تبدیل شدند. بنابراین نخستین موجودات زنده غذاساز بودند. **وُسه** همچنین پیشنهاد کرد که ابتدایی‌ترین متابولیسم‌ها از واکنش‌های شیمیایی زیادی که توسط کوفاکتورهای غیرپروتئینی (مواد ضروری برای عمل خیلی از آنزیم‌های پروتئینی در یاخته‌های زنده) کاتالیز شدند، تشکیل شده است. فقط این کوفاکتورها با غشاءها مرتبط بودند.

پیدایش فتوسنتز و سوخت‌وساز اکسیداتیو

تولید غذا از طریق فتوسنتز در چندین گروه مجزای باکتری‌ها تکامل یافته است. در فرایند فتوسنتز، اتم‌های هیدروژن بدست آمده از آب با دی‌اکسید کربن حاصل شده از هوا یا محلول در آب واکنش نشان داده و قندها و اکسیژن مولکولی تولید کردند. در این فرایند انرژی در شکل پیوندهای کووالان بین اتم‌های کربن در مولکول قند ذخیره می‌شود. قندها مواد مغذی مورد نیاز موجود زنده را فراهم می‌کنند و اکسیژن مولکولی به جو آزاد می‌شود.

$$۶CO_۲ + ۶H_۲O \xrightarrow{\text{نور}} C_۶H_{۱۲}O_۶ + ۶O_۲$$

این معادله واکنش‌های زیادی را که اکنون مشخص شده که در فتوسنتز اتفاق می‌افتد، خلاصه می‌کند. بدون شک این واکنش‌ها به‌طور هم‌زمان پدیدار نمی‌شوند و ترکیبات احیاگر دیگری مانند سولفید هیدروژن ($H_۲S$) احتمالاً منابع اولیه هیدروژن بوده‌اند.

به تدریج اکسیژن حاصل از فتوسنتز در جو زمین جمع شده است. زمانی‌که اکسیژن جوی تقریباً به ۱٪ سطح کنونی خود رسید اُزون شروع به انباشته شدن – در لایه بیرونی جو- کرد و پرتو فرابنفش را جذب نمود. لذا به میزان زیادی ورود نور فرابنفش به سطح زمین محدود شد. سپس خشکی و سطح آب‌ها توسط موجودات فتوسنتزکننده اشغال شد و تولید اکسیژن افزایش یافت.

انباشته شدن اکسیژن جوی، از متابولیسم غیرهوازی یاخته‌ای که در جو احیاگر آغازین تکامل یافته بود جلوگیری کرد. همان‌طور که به‌تدریج گاز اکسیژن ($O_۲$) در جو انباشته شد، نوع جدیدی از سوخت و ساز با راندمان بالا به نام «**سوخت‌وساز اکسیداتیو (هوازی)**» پدیدار شد. با استفاده از اکسیژن قابل دسترس به عنوان پذیرنده نهایی الکترون و گلوکز کاملاً اکسید شده به دی‌اکسید کربن و آب، بازیافت انرژی پیوندی ذخیره شده توسط فتوسنتز افزایش یافت. بیشتر شکل‌های حیات کاملاً وابسته به سوخت‌وساز اکسیداتیو شدند.

جو امروزه قویاً اکسید کننده است. این جو حاوی ۷۸٪ نیتروژن مولکولی، تقریباً ۲۱٪ اکسیژن آزاد، ۱٪ آرگون و ۰/۰۳٪ دی‌اکسید کربن است. گرچه زمان تولید اکسیژن جوی، همچنان مورد بحث است، معهذا مهم‌ترین منبع اکسیژن، فتوسنتز است. تقریباً تمام اکسیژن تولید شده فعلاً از سیانوباکتری‌ها (جلبک‌های آبی - سبز)، جلبک‌های یوکاریوتی و گیاهان حاصل می‌شود. هر روز این موجودات تقریباً ۴۰۰ میلیون تن از دی‌اکسید کربن را با ۷۰ میلیون تن هیدروژن ترکیب کرده و ۱/۱ میلیارد تن اکسیژن تولید می‌کنند. اقیانوس‌ها منبع اصلی اکسیژن هستند. امروزه تقریباً تمام اکسیژن تولید شده صرف تنفس موجودات زنده می‌شود، در غیر این صورت مقدار اکسیژن در جو به‌طور تقریب در ۳۰۰۰ سال دو برابر می‌شد. چون سیانوباکتری‌های سنگواره‌ای دوره پرکامبرین[2] شبیه سیانوباکتری‌های امروزی می‌باشند، منطقی است که فرض شود که ورود اکسیژن به جو اولیه از فتوسنتز آن‌ها ناشی شده‌است.

حیات در پرکامبرین

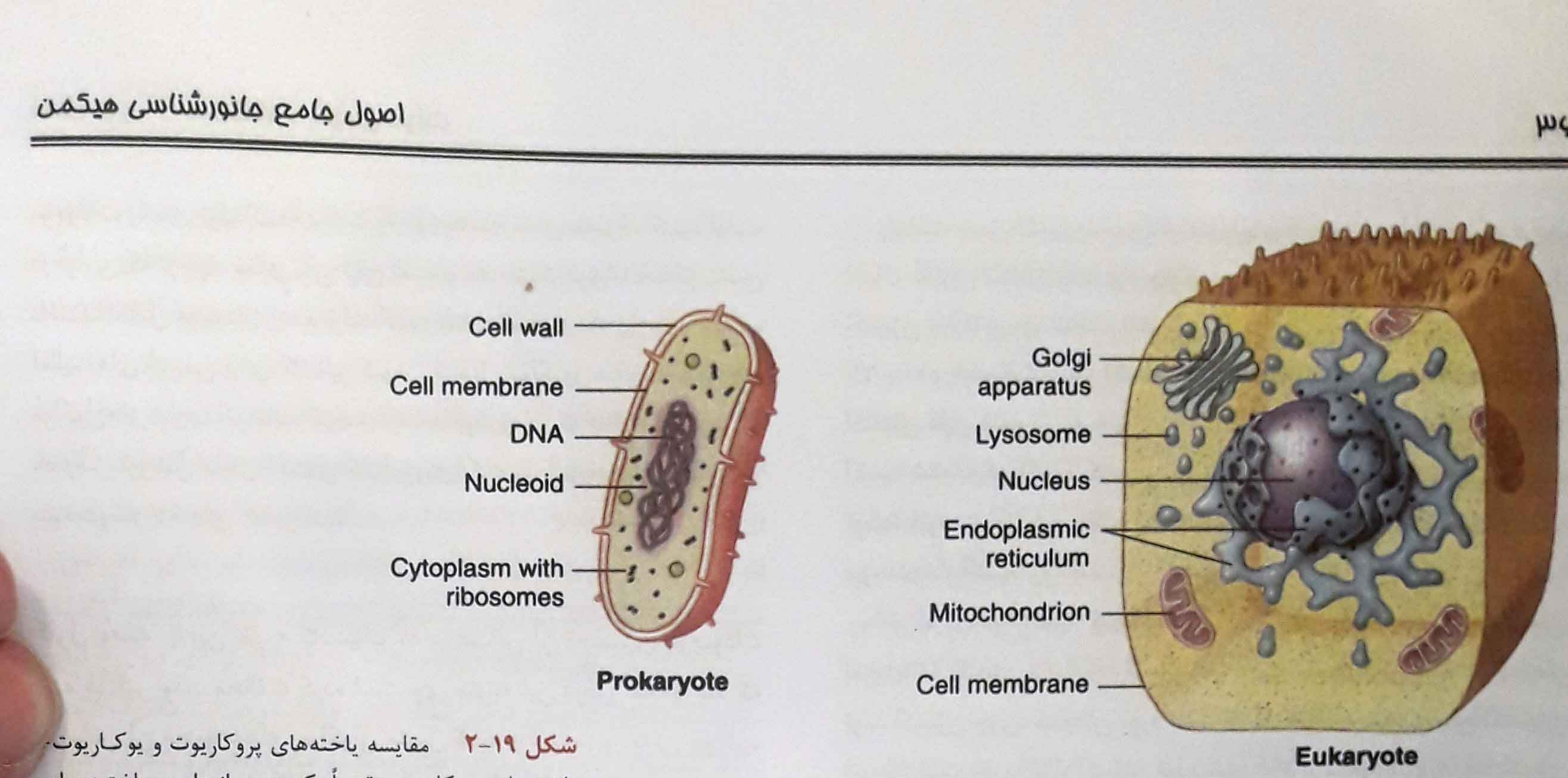
پرکامبرین تمام زمان زمین‌شناسی قبل از آغاز دوره کامبرین دوران اول را که در حدود ۵۷۰ تا ۶۰۰ میلیون سال پیش بوده است پوشش می‌دهد. بیشترین شاخه‌های جانوری یافت شده در نهشته‌های سنگواره‌ای در چندین میلیون سال نخست دوره کامبرین پدیدار شدند. این پیدایش ناگهانی به «انفجار کامبرین» معروف است، زیرا قبل از این زمان رسوبات سنگواره‌ای، عمدتاً فاقد موجودات پیچیده‌تر از باکتری‌های تک یاخته‌ای بوده‌اند. در حال حاضر مطالعات مقایسه‌ای مولکولی نشان می‌دهد که کمبود سنگواره در پرکامبرین احتمالاً ناشی از فقدان پدیده سنگواره شدن است تا فقدان تنوع جانوری در این دوران. با این وجود، زمان پیدایش جانوران بر روی زمین با تاخیر در تاریخ حیات روی زمین آورده شده است. حال این پرسش مطرح می‌شود که نخستین اشکال حیات که تولید جو اکسید کننده بحرانی برای تکامل جانوران نموده‌اند چه بوده و تباری که جانوران از آن بوجود آمده‌اند کدام بوده است؟

پروکاریوت‌ها و عصر سیانوباکتری‌ها (جلبک‌های سبز - آبی)

نخستین موجودات زنده‌ای که تکثیر یافتند باکتری مانند بودند و اشکال بسیار متنوعی را تولید کردند که بعضی از آن‌ها قادر به فتوسنتز بودند. از این‌جانداران **سیانوباکتری‌های** تولید کننده اکسیژن تقریباً ۳ میلیارد سال پیش به‌وجود آمدند.

1- Carl Woese

2- Precambrian



شکل ۱۹-۲ مقایسه یاخته‌های پروکاریوت و یوکاریوت. یاخته‌های پروکاریوت تقریباً یک دهم اندازه‌ی یاخته‌های یوکاریوت هستند.

باکتری‌ها و کهن باکتری‌ها، **پروکاریوت‌ها** نامیده می‌شوند که در لغت به معنای پیش از هسته است. پروکاریوت‌ها دارای یک مولکول بزرگ DNA هستند که فاقد هسته با مرز غشائی است، بلکه در ناحیه هسته یا **شبه‌هسته**[1] یافت می‌شود. DNA با پروتئین‌های هیستون ترکیب نشده، و پروکاریوت‌ها فاقد اندامک‌های غشائی مانند میتوکندری‌ها، پلاستیدها، سازگان گلژی و تورینه اندوپلاسمیک هستند (به فصل ۳ مراجعه شود). در طی تقسیم یاخته‌ای، شبه هسته تقسیم شده و همتاهای DNA یاخته بین یاخته‌های دختری توزیع می‌شود. پروکاریوت‌ها فاقد سازمان‌بندی کروموزومی و تقسیم کروموزومی (میتوزی) موجود در جانوران، قارچ‌ها و گیاهان هستند.

نام "سیانوباکتری" مدت‌ها است که جای اصطلاح جلبک سبز-آبی را گرفته است، زیرا این اصطلاح به غلط دلالت بر این نکته می‌کند که پروکاریوت‌ها به جلبک‌های هسته‌دار بسیار مرتبط است. این موجودات مسئول تولید جو غنی از اکسیژن هستند که جایگزین جو احیاگر آغازین زمین شده است. مطالعه واکنش‌های بیوشیمیایی سیانوباکتری‌های موجود نشان می‌دهد که این جانداران در زمانی که غلظت اکسیژن کمتر از مقدار کنونی بود تکامل یافته‌اند. به‌عنوان مثال، هر چند سیانوباکتری‌ها می‌توانند غلظت‌های بالای اکسیژن جو (۲۱٪) را تحمل کنند، لیکن غلظت بهینه برای خیلی از واکنش‌های متابولیکی آن‌ها فقط ۱۰٪ است.

باکتری‌ها، به ویژه سیانوباکتری‌ها بدون چالش به مدت ۱ تا ۲ میلیارد سال بر اقیانوس‌ها و دریاها غلبه داشتند. سیانوباکتری‌ها تقریباً ۱ میلیارد سال پیش به اوج موفقیت خود رسیدند، زمانی‌که شکل‌های رشته‌ای گسترده‌های شناور بزرگی بر روی سطوح اقیانوس‌ها تولید کردند. این دوره طولانی از چیرگی سیانوباکتری‌ها، حدود دو سوم تاریخ حیات را دربرگرفت به همین دلیل "عصر جلبک سبز ـ آبی" نامیده شد.

1- Nucleoid

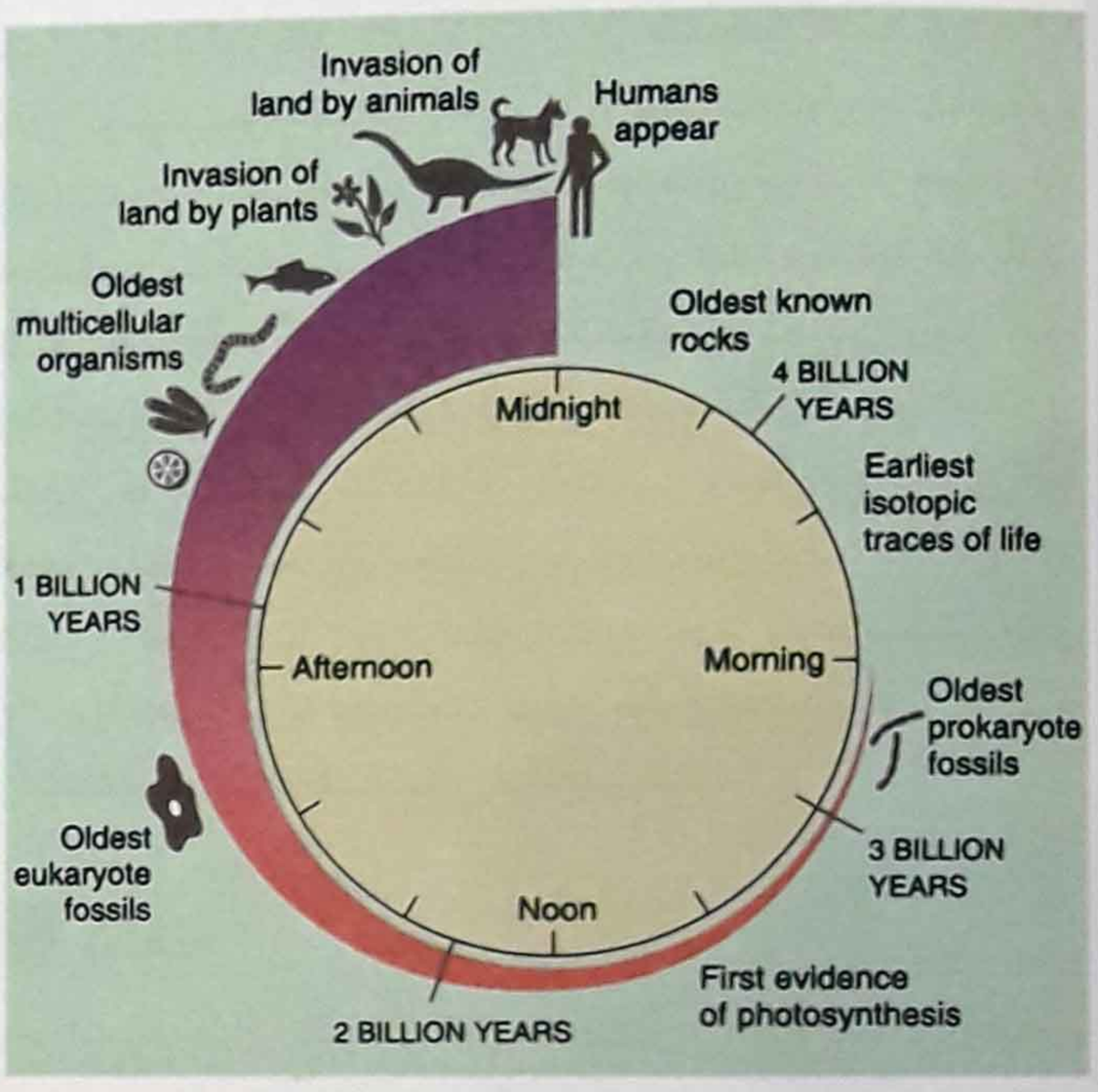
کارل وُسه و همکارانش در دانشگاه ایلینویز[2] فاصله‌ی تکاملی یوباکتری‌ها[3] (باکتری حقیقی) و کهن باکتری‌ها[4] که کهن زیان نیز نامیده می‌شوند را کشف کردند. اگرچه این دو گروه باکتری وقتی با میکروسکوپ الکترونی مشاهده می‌شوند خیلی مشابه هم هستند، ولی از نظر بیوشیمیایی متفاوتند. کهن باکتری‌ها در سوخت‌وساز یاخته‌ای اساساً متفاوت از باکتری‌های حقیقی هستند و دیواره‌های یاخته‌ای آن‌ها فاقد اسید مورامیک است که در دیواره‌های یاخته‌ای تمام باکتری‌های عالی وجود دارد. جالب‌ترین دلیل برای متمایز کردن این دو گروه با استفاده از یکی از جدیدترین و قوی‌ترین وسایل که در دسترس تکامل گرایان است، توالی اسیدهای نوکلئیک می‌باشد. وُسه متوجه شد که کهن باکتری‌ها اساساً از سایر باکتری‌ها در توالی بازهای **RNA** ریبوزومی اختلاف دارند. وُسه نشان داد که کهن باکتری‌ها با باکتری‌های واقعی بسیار متفاوت هستند و در قلمرو جداگانه رده‌بندی به نام کهن زیان[5] (در کنار باکتری‌های حقیقی و یوکاریوت‌ها-م) قرار می‌گیرند.

پیدایش هسته‌داران

هسته‌داران راستین[6] یا **یوکاریوت‌ها** (هسته واقعی، شکل ۱۹-۲) دارای یاخته‌هایی با هسته‌های با مرز غشائی حاوی **کروموزوم‌های** متشکل از **کروماتین** هستند. اجزاء سازنده‌ی کروماتین یوکاریوتی علاوه بر DNA شامل پروتئین‌هایی به نام **هیستون‌ها** و RNA هستند. برخی پروتئین‌های غیرهیستونی با DNA پروکاریوتی و کروموزوم‌های یوکاریوتی پیوسته‌اند. یوکاریوت‌ها عموماً بزرگ‌تر از پروکاریوت‌ها هستند و دارای DNA خیلی بیشتری می‌باشند. تقسیم یاخته‌ای معمولاً از طریق میتوز صورت می‌گیرد. درون یاخته‌های آن‌ها تعداد زیادی اندامک‌های غشائی از جمله میتوکندری

2- Illinois
3- Eubacteria
4- Archaebacteria
5- Archaea
6- Eukaryotes

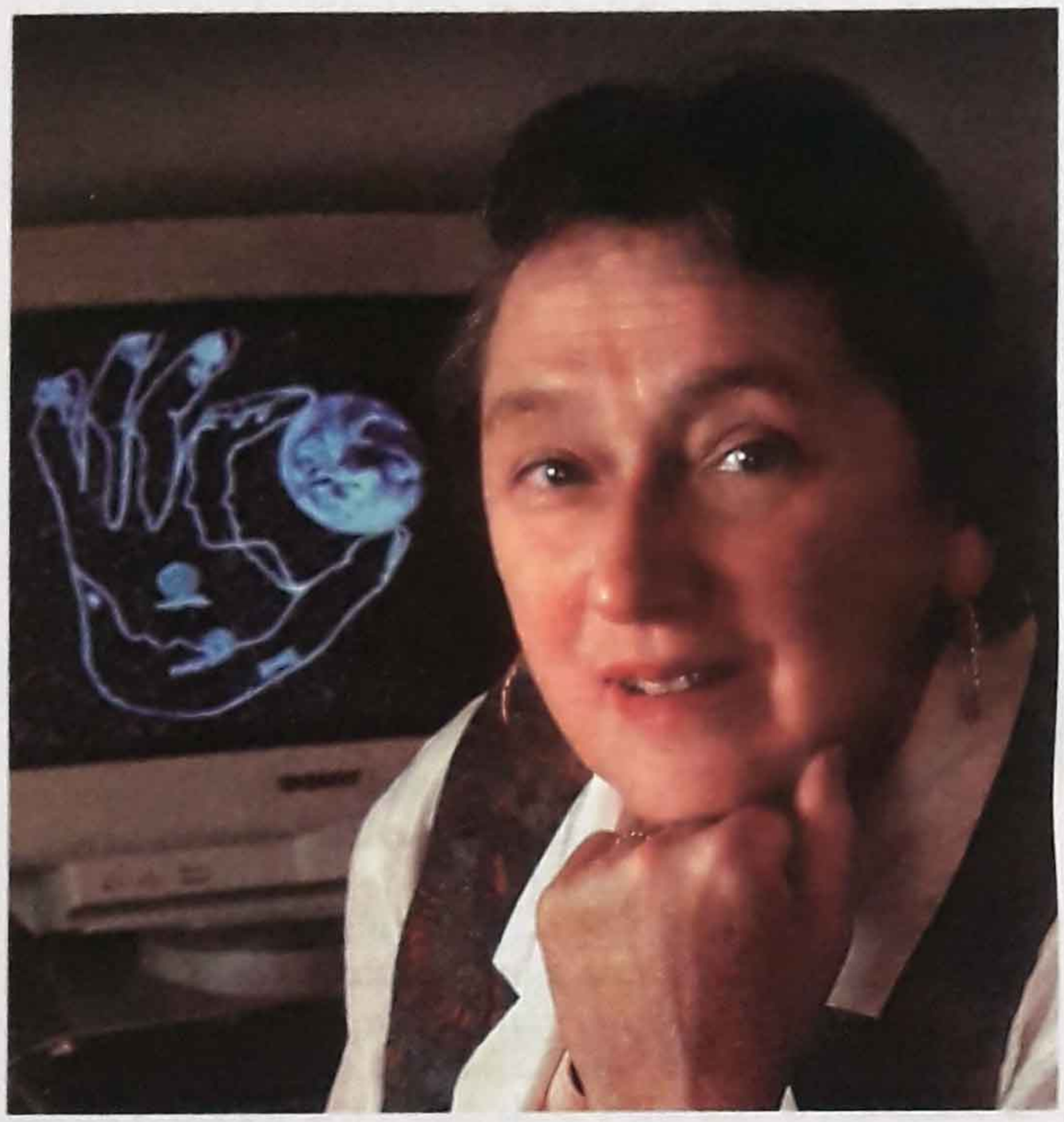
وجود دارد که درون آن آنزیم‌های سوخت‌وساز اکسیداتیو بسته‌بندی شده‌اند. یوکاریوت‌ها شامل جانوران، قارچ‌ها، گیاهان و اشکال زیادی از تک یاخته‌ای‌ها که اساساً تک یاختگان[1] نامیده می‌شوند، هستند. مشاهدات سنگواره‌ای نشان می‌دهد که یوکاریوت‌های تک یاخته‌ای حداقل ۱/۵ میلیارد سال پیش بوجود آمده‌اند (شکل ۲۰-۲).



شکل ۲۰-۲ ساعت زیستی. یک میلیارد ثانیه پیش، سال ۱۹۶۱ بود و بیشتر دانشجویانی که در حال خواندن این متن هستند هنوز متولد نشده بودند. یک میلیارد دقیقه پیش امپراتوری روم در اوج بود. یک میلیارد ساعت پیش انسان نئاندرتال زنده بود. یک میلیارد روز پیش اولین گونه‌های انسانی دوپا روی زمین قدم می‌زد. یک میلیارد ماه پیش دایناسورها در اوج شکوفایی بودند. یک میلیارد سال پیش هیچ جانوری روی سطح زمین قدم نمی‌زد.

مطالعه توالی بازهای آلی روشی بسیار موفق برای آشکار کردن دودمان‌شناسی اشکال زنده گذشته حیات است. توالی نوکلئوتیدی DNA ژن‌های هر موجود زنده سندی از روابط تکاملی هستند، زیرا هر ژنی که امروزه وجود دارد کپی تکامل یافته از ژنی است که میلیون‌ها یا حتی میلیاردها سال پیش بوجود آمده است. ژن‌ها با پیشرفت زمان از طریق جهش‌ها تغییر یافته‌اند ولی بقایای ژن اصلی معمولاً وجود دارد. با روش‌های جدید می‌توان توالی نوکلئوتیدی یک مولکول DNA کامل یا قطعات کوتاهی از مولکول را تعیین کرد. وقتی‌که ژن‌های متناظر بین دو موجود مختلف با هم مقایسه شوند میزان اختلاف ژن‌های آنها با هم می‌تواند با زمان سپری‌شده ارتباط داشته باشد. زیرا دو موجود از یک نیای مشترک منشعب شده‌اند. این قبیل مقایسه‌ها در RNA و پروتئین‌ها نیز صورت گرفته است. این روش‌ها نیز اجازه داده‌اند تا دانشمندان ژن‌ها و پروتئین‌هایی را که مدت‌های طولانی غیرفعال بوده را سنتز کنند و خواص بیوشیمیایی پروتئین‌های غیرفعال را اندازه بگیرند.

از آنجا که پیچیدگی سازمان‌بندیائی[2] یوکاریوت‌ها بیشتر از پروکاریوت‌ها است، پیش‌بینی اینکه چگونه یک یوکاریوت می‌تواند از پروکاریوتی شناخته شده ناشی شود سخت است. زیست‌شناس آمریکایی **لین مارگولیس**[3] (شکل ۲۱-۲) و دیگران پیشنهاد کردند که یوکاریوت‌ها از یک پروکاریوت



شکل ۲۱-۲ دکتر لین مارگولیس، که نظریه درون همزیستی وی که خاستگاه میتوکندری‌ها و کلروپلاست‌ها را نشان داده، توسط مطالعات تکامل مولکولی قویاً تأیید شده است.

مشتق نشده‌اند بلکه از **همزیستی**[4] (زندگی با هم) دو یا چند نوع باکتری ناشی شده‌اند. به‌عنوان مثال میتوکندری‌ها و پلاستیدها (اندامک‌های فتوسنتزی که در یاخته‌های گیاهی پیدا می‌شوند) هر یک DNA خودشان را دارند (جدا از هسته یاخته‌ای) و دارای برخی صفات پروکاریوتی هستند. هسته‌ها، پلاستیدها و میتوکندری‌ها هر یک دارای ژن‌های کدکننده‌ی RNA ریبوزومی هستند. مقایسه توالی بازهای این ژن‌ها نشان داد که DNA های هسته، پلاستید و میتوکندری نمایشگر روندهای تکاملی مجزایی هستند. DNAهای پلاستید و میتوکندری در تاریخ تکاملی خود به DNAهای باکتری نزدیکتر هستند تا DNA هسته یوکاریوتی. پلاستیدها از نظر تکاملی به سیانوباکتری‌ها نزدیکتر هستند و میتوکندری‌ها به گروه دیگری از باکتری‌ها (باکتری‌های صورتی[5]) نزدیکتر هستند که سازگار با فرضیه‌ی هم‌زیستی خاستگاه‌های یوکاریوتی است. میتوکندری‌ها دارای آنزیم‌های سوخت‌وساز اکسیداتیو هستند و پلاستیدها (یک پلاستید دارای کلروفیل کلروپلاست است) فتوسنتز را هدایت می‌کنند. تصور این امر آسان

1- Protozoan or Protists
2- Organizatioal
3- Lynn Margulis
4- Symbiosis
5- Rickettsias

است که چگونه یاخته میزبان در سیتوپلاسم خود قادر است چنین مهمان‌هایی را جا دهد و موفقیت تکاملی زیادی را کسب نماید.

نظریه‌ی درون ـ همزیستی[1] چنین مطرح می‌شود که جمعیت اجدادی یوکاریوت‌ها از باکتری‌های **غیرهوازی** (فاقد سوخت‌وساز اکسیداتیو) بوجود آمده‌اند و از تاخوردگی غشاء یاخته‌ای به طرف داخل، هسته و سایر غشاءهای داخل یاخته‌ای تکامل یافته‌اند. یاخته‌های این جمعیت از طریق زندگی انگلی باکتری‌های هوازی را بدست آورده، از هضم آن پرهیز کرده و در سیتوپلاسم خود حفظ کرده‌اند. باکتری‌های هوازی درون – همزیست اکسیژن را متابولیزه می‌کردند (که برای میزبان غیرهوازی آن‌ها سمی بود) و یاخته میزبان غیرهوازی غذا و حفاظت فیزیکی باکتری‌های هوازی مقیم خود را فراهم می‌کردند. این ارتباط دوجانبه مفید انتخاب را برای یاخته‌های میزبان ایجاد کرد و با ارتباط متقابل به صورتی ماندگار تکامل یافتند. پیامد تکاملی این انتخاب، تشدید درون همزیستی و حذف ژن‌های مازاد بر میزبان (یا برعکس) بود.

داده‌هایی که برای آزمون این فرض گردآوری شده است نشان می‌دهد که این مکانیسم پیشنهادی منطقی است. نتایج سنگواره‌ای نشان می‌دهد که باکتری‌های هوازی و غیرهوازی ۲/۵ میلیارد سال پیش به وضوح به وجود آمده و یاخته‌های هسته‌دار و غشاءهای داخل یاخته‌ای اولین بار در این زمان ظاهر شدند. برخی از اشکال غیرهوازی هسته‌دار و فاقد میتوکندری اکنون وجود دارند که از جمله انگل انسانی *Giardia intestinalis* را می‌توان نام برد. هر چند که این اشکال احتمالاً نشانگر بقایای رده‌هایی هستند که قبلاً دارای میتوکندری بوده و آن‌ها را از دست داده‌اند و نباید تصور کرد که اجداد آن‌ها هرگز میتوکندری نداشته‌اند. یاخته‌های هسته‌دار دارای میتوکندری تقریباً ۱/۲ میلیارد سال پیش پدید آمدند. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد باکتری‌ها به داخل تک‌یاخته‌های هسته‌دار وارد شده و به صورت یک واحد هم‌زیست نسل‌های زیادی تکثیر یافتند. این آزمایش‌ها نشان داد که یاخته میزبان می‌تواند به باکتری مهمان از نظر پروتئین‌هایی که قبل از همزیستی تجربی توسط یاخته میزبان ساخته می‌شده، وابسته شود.

نخستین هسته‌داران بی تردید تک یاخته‌ای و خیلی از آنها تولید کنندگان فتوسنتزی بوده‌اند. بعضی از این اشکال توانایی فتوسنتزشان را از دست داده، مصرف کننده شده و از تولیدکنندگان هسته‌دار و پروکاریوت تغذیه کرده‌اند. همزمان با پیدایش سیانوباکتری‌ها، تورینه‌های متراکم رشته‌ای آنها ظریف شد، و فضائی برای سایر موجودات را فراهم کرد. جانوران گوشت‌خوار ظاهر شدند و از جانوران علف‌خوار تغذیه کردند. به زودی اکوسیستمی متعادل از جانوران گوشت‌خوار، علف‌خوار و تولیدکننده‌های اولیه پدید آمد. علف‌خوارهای چراگر در فضای آزاد ایجادشده، باعث تنوع بیشتر تولیدکننده‌ها شدند، آنها هم به نوبه خود تکامل علف‌خوارهای جدید و اختصاصی‌تر را باعث شدند. به این ترتیب هرم بوم‌شناختی با جانوران گوشت‌خوار در راس زنجیره غذایی به وجود آمد.

شکوفایی فعالیت تکاملی که در اواخر پره‌کامبرین و آغاز دوره کامبرین ادامه یافت بی‌سابقه بود. بعضی از محققین چنین فرض کردند علت "انفجار کامبرین[5]" تجمع اکسیژن جو در سطح آستانه‌ی بحران بوده است. جانوران بزرگ پریاخته‌ای نیاز به سوخت‌وساز هوازی موثر فزاینده دارند. این مسیرها در شرایط محدودیت غلظت اکسیژن امکان‌پذیر نیست.

خلاصه

موجودات زنده دارای یکنواختی قابل ملاحظه‌ای در اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی شیمیایی و سوخت‌وسازشان هستند که منعکس کننده‌ی زادمان مشترک از یک نیای کهن است.

حیات بر روی زمین نمی‌توانسته بدون آب که جزء اصلی یاخته‌های زنده است، به وجود آمده باشد. ساختمان بی‌همتای آب و توانایی آن در تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های مجاور، مسؤول خواص ویژه‌ی آن است که عبارتند از: حلالیت، ظرفیت حرارتی بالا، نقطه جوش، کشش سطحی و چگالی کمتر آن در حالت جامد نسبت به حالت مایع.

حیات هم‌چنین به‌طور اساسی وابسته به شیمی کربن است. کربن به ویژه در اتصال با خودش و اتم‌های دیگر دارای کاربردهای متعدد است و تنها عنصر توانا در تشکیل مولکول‌های بزرگ در موجودات زنده است. کربوهیدرات‌ها اساساً از کربن، هیدروژن و اکسیژن که به‌صورت H-C-OH قرار دارند تشکیل شده‌اند. ساده‌ترین کربوهیدرات‌ها قندها هستند که به‌عنوان منابع انرژی بی‌واسطه مستقیم در سازگان‌های زنده عمل می‌کنند. منوساکاریدها یا قندهای ساده ممکن است به یکدیگر متصل شده تا دی‌ساکاریدها یا پلی‌ساکاریدها را تشکیل دهند، که به‌عنوان اشکال ذخیره قند عمل کرده یا نقش‌های ساختمانی ایفا می‌کنند. لیپیدها دسته‌ی دیگری از مولکول‌های بزرگ را به شکل زنجیرهایی از ترکیبات کربنی تشکیل می‌دهند: چربی‌ها اساساً به‌صورت چربی‌های خنثی، فسفولیپیدها و استروئیدها وجود دارند. پروتئین‌ها مولکول‌های بزرگی هستند که از اسیدهای‌آمینه تشکیل شده و از طریق پیوندهای پپتیدی به یکدیگر متصل

افزون بر این ادعا که میتوکندری‌ها و پلاستیدها از هم‌زیست‌های باکتریایی منشاء گرفته‌اند، **لین مارگولیس** نشان داد که تاژک یوکاریوتی[2]، مژک‌ها[3] (ساختمان‌های حرکتی) و حتی دوک میتوزی از یک نوع باکتری، شبیه یک **اسپیروکت**[4] {م: **باکتری تک یاخته‌ای مارپیچی با دیواره نازک**} ناشی شده‌اند. او پیشنهاد کرد که این اتحاد (**اسپیروکت** با یاخته میزبان جدید آن) تکامل میتوز را امکان‌پذیر ساخت. مشاهده‌ی **مارگولیس** که اندامک‌ها همتاهای پیشین یاخته اجدادی هستند، اکنون توسط بیشتر زیست‌شناسان پذیرفته شده است. به اتحاد بین موجودات زنده مختلف برای تولید اشکال تکاملی جدید، همزیستی گفته می‌شود.

1- Endosymbiotic Theory
2- Eukaryote Flagella
3- Cilia
4- Spirochete

5- Cambrian Explosion

شده‌اند. خیلی از پروتئین‌ها به‌عنوان آنزیم‌هایی عمل می‌کنند که واکنش‌های زیست شناختی را کاتالیز می‌کنند. هر پروتئینی دارای ساختمان اول، دوم، سوم و اغلب چهارم مشخصی می‌باشند که برای عملکرد آن ضروری است. اسیدهای نوکلئیک پلیمرهایی از واحدهای نوکلئوتیدی هستند که هر یک از آن‌ها از یک قند، یک باز نیتروژنه و یک فسفات تشکیل شده‌است. آن‌ها دارای ماده توارثی هستند و در سنتز پروتئین عمل می‌کنند.

آزمایشات لویی پاستور در سال ۱۸۶۰ دانشمندان را متقاعد کرد که موجودات بطور مکرر از ماده معدنی ناشی نشده‌اند. حدود ۶۰ سال بعد اپارین و هالدین توضیحی برای این‌که چگونه یک نیای مشترک برای تمام شکل‌های زنده می‌تواند از ماده غیرزنده حدود ۴ میلیارد سال پیش به‌وجود آمده باشد را ارائه دادند. حیات پس از یک دوره‌ی طولانی از تکامل غیرزیستی مولکولی بر روی زمین که در این دوره مولکول‌های آلی به آهستگی در یک سوپ آغازین تجمع یافتند، آغاز شده است. جو زمین آغازین احیاگر دارای مقدار کم یا فاقد اکسیژن آزاد بوده است. تابش فرابنفش، تخلیه الکتریکی نور یا انرژی از چشمه‌های آب گرمایش می‌توانستند انرژی تشکیل نخستین مولکول‌های آلی را فراهم کرده باشند. استنلی میلر و هارلد اوری احتمال فرضیه اپارین- هالدین را با استفاده از آزمایشات ساده ولی مبتکرانه ثابت کردند. غلظت واکنشگرهای مورد نیاز برای سنتز اولیه‌ی مولکول‌های آلی احتمالاً درون وزیکول های متشکل از مجموعه‌ی اسیدهای چرب و الکل‌های دارای زنجیره‌ی طویل درون غشاءهای پیش یاخته‌ای، فراهم شده بود. RNA احتمالاً مولکول زیستی آغازین بوده که اعمال رمزدهی اطلاعات ژنتیکی و عمل کاتالیزوری را انجام می‌داده است. وقتی سازگان‌های خود همانندساز بنیان گذاری شد، تکامل به‌وسیله گزینش طبیعی توانست گوناگونی و پیچیدگی آن‌ها را افزایش دهد.

فرض بر این است که نخستین موجودات زنده، مصرف کننده‌های اولیه‌ای بودند که روی انرژی ذخیره شده در مولکول‌های حل شده در سوپ آغازین زندگی می‌کردند. تکامل، سپس موجودات زنده تولیدکننده ایجاد کرد که می‌توانستند مواد غذایی آلی (کربوهیدرات‌ها) خودشان را از مواد معدنی بسازند. تولید کنندگان بهتر از مصرف کنندگان با حذف ترکیبات آلی از محیط خود محافظت می‌شوند. اکسیژن مولکولی تدریجاً شروع به تجمع در جو نخستین به عنوان محصول نهایی فتوسنتز کرد. در این فرآیند تولید کننده قندها و اکسیژن از طریق واکنش آب و دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. به نظر می‌رسد سیانوباکتری‌ها اساساً مسئول تولید اکسیژن جو اولیه در تاریخ حیات هستند.

تمام باکتری‌ها، پروکاریوت هستند و موجوداتی را شامل می‌شوند که فاقد هسته با مرز غشائی و اندامک‌های درون سیتوپلاسمی هستند. پروکاریوت‌ها دارای دو گروه مجزا می‌باشند: کهن زیان و باکتری‌ها.

هسته‌داران ظاهراً از واحدهای همزیست دو یا چند نوع پروکاریوت مشتق شده‌اند. ماده‌ی ژنتیکی (DNA) یوکاریوت‌ها در هسته‌ای با مرز غشائی، میتوکندری‌ها و گاهی اوقات در پلاستیدها حمل می‌شود. میتوکندری‌ها و پلاستیدها شبیه باکتری‌ها هستند و DNAی آن‌ها بیشتر هم خانواده با DNA باکتری‌های خاص است تا با ژنوم هسته یوکاریوت‌ها.

پرسش‌های مروری

۱. هر کدام از ویژگی‌های آب را که در اینجا به آن‌ها اشاره شده توضیح دهید و بیان کنید که هر کدام از این ویژگی‌ها چگونه با طبیعت دو قطبی آب قابل توجیه می‌باشند: ظرفیت ویژه گرمایی بالا، گرمای بالای تبخیر، رفتار چگالی منحصربه‌فرد، چسبندگی زیاد، حلالیت خوب برای یون‌های نمک‌ها.
۲. ترکیب جو زمین در زمان خاستگاه حیات چه بود، و چه تفاوتی با جو زمین در زمان حال داشت؟
۳. با توجه به آزمایش‌های میلر و اوری که در این فصل توضیح داده شدند، بیان کنید که اصطلاحات زیر بیانگر چه اطلاعاتی هستند: مشاهدات، فرضیه، استنباط، پیش‌بینی، اطلاعات، کنترل
۴. اهمیت آزمایش‌های میلر- اوری را شرح دهید.
۵. سه منبع مختلف انرژی را نام ببرید که در ابتدای حیات انرژی لازم را برای تشکیل ترکیبات آلی فراهم کرده‌اند.
۶. مولکول‌های آلی توسط چه مکانیسمی توانسته‌اند در غشاء نیمه‌تراوا در دنیای غیر زنده تمرکز یابند، تا واکنش‌های پلی‌مر شدن بتواند رخ دهد؟
۷. دوکربوهیدرات ساده، دو کربوهیدرات ذخیره‌ای و یک کربوهیدرات ساختاری نام ببرید.
۸. از نظر ساختار مولکولی، چه تفاوت‌هایی بین لیپیدها و کربوهیدرات‌ها وجود دارد؟
۹. تفاوت بین ساختارهای اول، دوم، سوم و چهارم پروتئین را توضیح دهید.
۱۰. اسیدنوکلئیک‌های مهم یاخته کدامند؟ و از چه واحدهایی تشکیل شده‌اند؟
۱۱. تفاوت بین مصرف‌کنندگان اولیه، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان دومین را بیان کنید.
۱۲. منبع اکسیژن جو کنونی چیست؟ اهمیت متابولیکی این گاز برای بسیاری از موجودات زنده کنونی چیست؟
۱۳. تفاوت‌های بین پروکاریوت‌ها و یوکاریوت‌ها را بیان کنید.
۱۴. دیدگاه مارگولیس در مورد خاستگاه یوکاریوت‌ها از پروکاریوت‌ها را توضیح دهید.
۱۵. انفجار کامبرین چه بود و شما آن را چگونه می‌توانید توضیح دهید؟

عمیق‌تر بیندیشید چرا دانش ما در مورد خاستگاه حیات در مقایسه با تکامل بعدی تنوع حیات سطحی‌تر - و چالش بر انگیزتر- است؟