

КОЛИ ПОЧАЛОСЯ ЖИТТЯ?

Чотири мільярди років тому поверхня землі почала холонути. Це неспокійне місце, обстрілюване метеоритами, покряне вулканічними виверженнями й оточене токсичною атмосферою. Але попри несприятливі умови відбувалося щось надзвичайне. З'явилася молекула чи, можливо, сукупність молекул, здатних до реплікації. З усіх дивовижних подій, які на нашій молодій планеті вже бували, ця була найдивовижнішою.

Щойно з'являються реплікатори, починається природний добір із метою здобуття переваги тих нащадків, чії варіації поліпшують їхню реплікацію. Незабаром з'являються перші прості клітини. Народилося життя.

Чарльз Дарвін був одним із перших, хто міркував про те, як це сталося. Він уявляв «невеличкий теплий ставок із вмістом аміаку й різноманітних фосфорних солей, світла, тепла, електрики тощо».

Теплі ставки більше не розглядаються як життєздатна колиска життя. Пропонувалися інші варіанти, серед яких відкритий океан, глибоководні гідротермальні джерела, радіоактивні пляжі та грудочки глини. Суть у тому, що ми не знаємо, звідки і як почалося життя. Але ми знаємо достатньо, щоб висловити обґрунтований здогад.

Початок чогось великого

Найдавніші з беззаперечних викопних бактерій датуються віком приблизно в 3 мільярди років, але загально-

визнано, що життя мало зародитися набагато раніше, принаймні 3,5 мільярда років тому. Коли саме, сказати важко. Багато давніх порід містять фізичні структури й хімічні маркери, які сприймаються як свідчення життя; найдавніша датується віком 4,1 мільярда років, хоча це здається здогадом, враховуючи, що на Землю ще чекали пізніші важкі бомбардування. Мабуть, найкраще припущення — 3,8 мільярда років тому.

Якщо відповідь на запитання «коли» визначити складно, то «як» ще складніше. Будь-яка теорія походження життя потребує пояснення трьох речей: як будівельні блоки складаються у складні молекули; як вони скупчувалися в такий закритий простір, як клітина; звідки надходила енергія для здійснення процесу. Мабуть, найближчою для нас є теорія з відповіддю на всі три запитання: на морському дні, в місцях, званих лужними гідротермальними отворами. Вони відрізняються від відомих вулканічних гідротермальних джерел, або «чорних курців», у які перегріта вода витікає з вулканічних щілин.

Лужні отвори, що сьогодні зустрічаються на Землі й, як вважається, були поширеними на ранніх етапах існування планети, набагато менш бурхливі за вулканічні. Вони є тріщинами на морському дні, крізь які потроху просочуються теплі розчини лугів.

Ці отвори утворюються, коли морська вода на дні реагує з мінералом під назвою олівін. Така реакція збагачує воду воднем і генерує тепло, з яким рідина з'являється на дні океану. Коли тепла рідка суміш потрапляє в холодну морську воду, мінерали осідають, поступово утворюючи пористі кам'яні труби заввишки до 60 метрів. Такі структури забезпечували все необхідне для інкубації життя.

Будівельні блоки

Почнімо з хімічних речовин. Стінки труб рясно вкривають мінерали, за участю яких утворюються складні органічні сполуки з CO₂ та водню — обидва щедро представлені в гейзерах. Тобто в результаті відбулося б спонтанне утворення молекул, які є складовими життєдіяльності, — амінокислот, цукрів і, головне, РНК.

РНК — близька родичка ДНК — визначально важлива для наших уявлень про походження життя. Коли біологи лише почали замислюватися над цим питанням, це здавалося незбагненим. Усі живі організми свою важку роботу здійснюють завдяки білкам. Білки можуть трансформуватись у найрізноманітніші форми, тож можуть робити практично все, зокрема здійснення хімічних реакцій життя. Однак інформація, необхідна для виготовлення білків, зберігається в ДНК. Неможливо створити нові білки без ДНК, але і нові ДНК неможливо створити без білків. То хто ж з'явився першим?

Відкриття того, що РНК може скласти ланцюжок своєї молекули, як білок, а також каталізувати реакції, вирішило цю проблему курки-яйця. Близько 25 років тому це породило думку, що перше життя складалося з молекул РНК, які каталізували своє власне виробництво. Лужні отвори здаються ідеальним місцем для розвитку цього РНК-світу.

Далі постає проблема локалізації, тобто треба уникнути розсіювання молекул. Сам лужний отвір міг би виконати цю роботу. В середині його поруватої структури були крихітні взаємопов'язані клітиноподібні утворення, огорожені тендітними мінеральними стінками. Вони могли містити й концентрувати РНК та інші складні молекули, що утворюються на поверхні.

Світ РНК також потребував енергії—і знов-таки гідротермальні джерела могли постачати її як природний «акумулятор», коли їхній рідкий вміст зустрічався з морською водою. Морська вода є кислою (багатою на протони), а рідина в отворах лужна (на протони бідна), тож там, де вони зустрічаються, є істотна різниця в концентрації протонів. Оскільки ці частки мають позитивний заряд, змішування створює електричний потенціал по всій зоні взаємодії.

Ця енергія має додатково сприяти реакціям між CO_2 й воднем, прискорюючи утворення складних молекул і довших ланцюжків РНК. У якийсь момент протоклітини еволюціонували способом експлуатації градієнта. Одним з найкращих доказів цього важливого кроку еволюції є те, що живі клітини й досі живляться поглинанням протонів через клітинні мембрани.

Простий рецепт

Існує багато інших варіантів. Але лужні гідротермальні джерела були ідеальним середовищем для світу РНК. Їх варіант не єдиний можливий, але вони є найкращим здогадом щодо колиски життя.

Залишається багато інших запитань. Як життя вирвалося з отворів на дні? Як відбувся перехід від РНК до ДНК й білків?

Ми, може, ніколи цього не дізнаємось. Але якщо дотримуватися гідротермальної теорії, то вона повідає нам цікаву істину. Адже тоді виникнення життя більше не є незбагненою таємницею—це лише майже неминучий наслідок планетарної системи з трьома основними інгредієнтами: твердою породою, морською водою й вуглекислим газом.

ГОСТІ З ДАЛЕКОГО КОСМОСУ

Цілком уможливленим уявленням про походження життя на Землі є ПАНСПЕРМІЯ, яка передбачає виникнення його десь у галактиці чи, можливо, на Марсі, й перенесення на Землю на кометі чи метеорі. Якщо так, то ми всі прибульці, й життя має бути старшим за 4 мільярди років перед появою на Землі. Однак панспермія не відповідає на головне запитання про те, як і коли розвинулося життя — вона просто переміщує його появу в інше місце.

ЯК РОЗВИНУЛОСЯ СКЛАДНЕ ЖИТТЯ?

Як писав дарвін у книжці «про походження видів», наша жива планета — одна з «нескінченно-го числа найпрекрасніших і найдивовижніших форм». Але кілька мільярдів років тому вона виглядала зовсім інакше. Попри наявність на Землі життя протягом майже 2 мільярдів років, воно залишалося цілком рудиментарним — лише бактерії та їхній позірно схожий, але насправді зовсім відмінний сестринський домен, археї. Найскладнішими живими істотами були колонії таких мікробів, як строматоліти та ціанобактеріальні мати. Жодних рослин, жодних тварин, просто безплідний пейзаж зі скелями, річками й океаном.

Виникнення цього нескінченного числа найкрасивіших форм — мабуть, найважливіша подія, що сталася на Землі з моменту зародження життя. Вона точно здається однією з наймалоймовірніших.

Протягом багатьох років біологи припускали, що виникнення складного життя є еволюційно неминучим: щойно виникнувши, просте життя поступово переросло в складніші форми, зрештою породивши тварин і рослини. Одначе здається, не так просто все це сталося. Після того, як уперше з'явилися прості клітини, настала надзвичайно довга перерва — майже на половину всього життя планети — до появи складніших істот. Тобто прості клітини розвинулись у складні лише один раз за 4 мільярди років еволюції, що говорить про дивовижність випадку.

Відсутні ланки

Якби прості клітини потроху еволюціонували в складніші протягом мільярдів років, мали б існувати усі види проміжних клітин, принаймні хоч деякі з них. Але таких немає. Натомість зяє порожнеча. З одного боку є крихітні бактерії й археї, разом відомі як прокаріоти. З іншого боку — величезні й неспівмірні еукаріоти, третій великий домен життя. Такий типовий одноклітинний еукаріот, як амеба, буде приблизно в 15 000 разів більшим за бактерію, і геном матиме відповідний.

Прокаріоти — це трохи більше, ніж крихітні мішечки з хімікатами. Вони, безперечно, є такі доволі складними мішечками, але порівняно з еукаріотичними клітинами прокаріоти — ніщо. Адже еукаріоти можуть похвалитися мініатюрними органами, що називаються органелами, внутрішніми мембранами, скелетами й транспортними системами. Вони співвідносяться з прокаріотами, як людина з амебами.

І тоді як бактерії ніколи не утворюють нічого складнішого за ланцюги чи колонії однакових клітин, еукаріотичні клітини об'єднуються й співпрацюють, щоб утворити все — від водоростей до секвой, від мураходів до зебр. Усі складні багатоклітинні форми життя — тобто майже все живе, що можна побачити навколо себе, — еукаріоти.

Усі еукаріоти еволюціонували від одного прабатька. Без цієї одноразової події життя мало б застрягнути на мікробному рівні. Клітини бактерій та археї просто не мають того, що треба для перетворення в складніші форми.

То що сталося? Критична подія, здається, відбулася близько 2 мільярдів років тому, коли одна проста клітина чомусь залишилася всередині іншої. Ідентифікувати клітину-господаря неможливо, але ми знаємо,

що вона поглинула другу бактерію, яка почала жити й ділитися всередині неї, як квартиронаймач. Двоє якись чином знайшли спосіб по-дружньому жити разом, і зрештою утворилися симбіотичні стосунки, звані ендосимбіозом.

Завдяки спільній еволюції протягом незліченних поколінь ендосимбіонти зрештою стали органелою, яку називають мітохондрією. Позбавившись колишньої бактеріальної природи, вони розвинули одну з ключових функцій: забезпечувати клітини енергією. Це був той критичний крок, який дав змогу життю скинути свої мікробні кайдани й набути нескінченних найпрекрасніших форм.

Турбозарядка

Після появи мітохондрій клітини змогли подолати фундаментальний бар'єр, який не дозволяє бактеріям і археям рости. Коротко кажучи, існує обмеження кількості енергії, яку можуть виробляти мікроби. Універсальний носій енергії клітини, аденозинтрифосфат (АТФ), виробляється на клітинній мембрані. А оскільки клітини збільшуються, за співвідношенням площа їхньої поверхні до об'єму зменшується, і вони мають відносно меншу площу мембрани для використання. І в разі збільшення клітин їхні енергетичні потреби швидко переганяють постачання. Клітина з мітохондріями (у яких є власні мембрани, що створюють АТФ) може подолати це просто шляхом додавання більшої кількості мітохондрій — те, що легко зробити, оскільки мітохондрії зберігають здатність своїх предків-бактерій клонуватися.

Прокинувшись із ескадронами мітохондрій, ранні еукаріоти завдяки достатку енергії змогли вільно рости й роз-

вивати більші й складніші геноми. І ці розширені геноми забезпечували генетичне забезпечення, що відкривало еволюцію дедалі складнішого життя.

На сонячних батареях

Це ще не було кінцем історії. Вважається, що черговий виток ендосимбіозу започаткував хлоропласт — органела, що дозволяє рослинам і водоростям перетворювати сонячне світло на цукор у процесі під назвою фотосинтез. Ендосимбіонтом у цьому випадку була фотосинтетична бактерія, яка вперше з'явилася на Землі приблизно 2,8 мільярда років тому. Ще одним важливим винаходом було клітинне ядро, де еукаріоти зберігають більшість своєї ДНК. Можливо, його утворив інший ендосимбіонт, можливо, вірус. Еукаріотичні клітини також обзавелись іншими органелами, такими як ендоплазматичний ретикулум, що виробляє білки, й апарат Гольджі, який пересилає їх до місця призначення, найімовірніше, шляхом розпаданя їхніх клітинних мембран.

Все це підготувало сцену для виникнення складних багатоклітинних форм життя. Треба зізнатися, для цього знадобився певний час. Першими великими багатоклітинними організмами були представники едіакарської біоти, форми життя, що мешкали в океані. Вони з'явилися приблизно 700 мільйонів років тому й зникли під час так званого кембрійського вибуху 540 мільйонів років тому, коли почала розвиватися більшість знайомих форм тварин.

Адже так чи так, едіакарські організми можуть простежити своє походження назад до еволюції мітохондрій. І це, здається, залежало від однієї події, що має вигляд випадкової ситуації—вливання однієї простої клітини

в іншу. Суть полягає в тому, що хоча просте життя має вигляд майже невідворотного, еволюція складного життя — зокрема й вашого — є фантастично неправдоподібною. Це справжнє диво життя на Землі.

НУДНА ПЛАНЕТА

Якщо життя інколи стомлює, можна поглянути на Землю в період між 1,7 та 0,7 мільярда років тому. Цей незрівнянно довгий проміжок часу був настільки безнадієвим, що біологи назвали його «нудним мільярдом». Причина передусім була геологічною, а не біологічною. Кора затверділа, але тектоніка плит насправді не почалася, що призвело до тривалого періоду геологічного застою, позбавленого розривів, вулканізму, підняття гір, континентального дрейфу й інших видів катаклізмів, які часто спричиняють еволюційні зміни.

НАЩО НАМ СЕКС?

(ОКРІМ ОЧЕВИДНОЇ ПРИЧИНИ)

Пташки, бджілки і, звичайно, блохи ним займаються. Рослини, гриби й амеби теж. Інколи здається, що секс—статеве розмноження—є скрізь. Але в біологічному розумінні йдеться про меншу частину. Перші 2 мільярди років життя на Землі його не існувало. Навіть зараз організми, що панують на планеті—бактерії й археї—ним не переймаються.

Походження сексу є певною мірою таємницею. І якщо її підстави важко зрозуміти, то його функція так само спантеличує.

На перший погляд це здається безглуздим. Безперечно, секс має очевидну функцію: він дає варіації, сировину для еволюції. Перестановка й рекомбінація генетичної інформації допомагає видам адаптуватися. Це також може допомогти поширенню корисних генів у популяції й усуненню шкідливих.

Але з цією нібито заснованою на здоровому глузді тезою є великі проблеми. Перше—секс є надзвичайно неефективним. Набагато більше сенсу в тому, щоб клонувати себе. Клонування дає набагато більше нащадків порівняно з сексом, а це означає, що безстатеві види легко б спричинили вимирання статевих шляхом виведення набагато більшої кількості потомства, що конкурує за ті самі ресурси.

Більше того, кожний клон має комбінацію генів, яка вже показала свою придатність. Секс, навпаки, створює нові, неперевірені й, можливо, неповноцінні поєднання.

Насправді сексуальна рекомбінація частіше порушує сприятливі комбінації генів, ніж породжує.

Звичайно, секс повинен бути перевагою в довгостроковій перспективі, протягом тисяч і мільйонів років. Безстатеві види зрештою накопичують мутації, яких неможливо позбутися, а ті спричиняють вимирання. Але еволюція не працює так. Вона не планує наперед, а натомість дбає про те, що тут і зараз.

І на цьому поневір'яння не закінчуються. Статевим видам доводиться шукати собі пару, боротися з суперниками й ризикувати підхопити венеричні захворювання.

Нарешті, якщо секс настільки вигідний, чому бактерії й археї ніколи його не застосовували, хоч час від часу вони обмінюються шматочками ДНК? І навпаки, якщо безстатеве розмноження настільки успішне, чому майже всі еукаріоти розмножуються статевим шляхом хоча б якийсь час? Через усі ці запитання секс примушує чухати потилицю багатьох біологів.

Протягом багатьох років найкращою відповіддю була «гіпотеза Чорної Королеви» — витончений евфемізм для пояснення тези «секс означає різноманітність». Вона означала гонку озброєнь між паразитами та їхніми носіями. Час зміни поколінь у паразитів настільки короткий, що вони перевершують у цьому своїх господарів. Завдяки викиданню нових сумішей генів із кожним поколінням секс дає змогу вижити принаймні кільком особинам. Термін названо на честь Чорної Королеви, бо, як і Аліса в «Задзеркаллі», мусимо щодуху бігти, щоб залишитися на тому самому місці.

На жаль, це не вирішує проблему. Паразити дають сексу вирішальну перевагу лише тоді, коли рівень передачі паразитів дуже високий, а наслідки — дуже серйозні. За нормальних обставин клони все одно перемагають.

Останніми роками почало застосовуватися нове пояснення. Воно ґрунтується на твердженні, що всі еукаріоти є або принаймні були статевими (існує безліч видів, які розмножуються поділом, але вони еволюціонували до безшлюбності лише зовсім недавно). Логічний висновок полягає в тому, що секс еволюціонував дуже рано на цій лінії у спільного предка всіх живих еукаріотів близько двох мільярдів років тому.

Крім сексу інша річ, яка об'єднує всіх еукаріотів,— це наявність мітохондрій, елементів живлення клітини. Нове пояснення стверджує, що це не випадково: мітохондрії зробили еволюцію сексу неминучою. Як так? Ключовим моментом є те, що мітохондрії мають свої геноми. Це залишок цілого генома відокремленої бактерії, поглинутої на світанку еволюції еукаріотів. Ми знаємо, що в міру еволюції двох більшість генів перейшли до геному господаря. Симбіонт також бомбардував господаря паразитичними стрибковими генами.

Кохання перемагає все

Інакше кажучи, придбання мітохондрій вивільнило бурхливе генетичне зміщення. За такого високого мутаційного тиску рівновагу було порушено, й секс став вигіднішим за безстатеве розмноження. Будь-який ранній еукаріот у своєму розвитку випереджав би своїх безстатевих суперників, які піддавалися непереборному впливу мутації.

Мітохондрії також пояснюють, чому секс залишається вигідним сьогодні. Геном мітохондрії кодує життєво важливі гени, але нічого не може зробити самостійно. Наприклад, він покладається на ядерний геном для виготовлення білків і копій своєї ДНК. Тому тісна співпраця

двох геномів клітини є життєво важливою для всього її функціонування, особливо у вирішальному завданні вироблення енергії.

Тісна співпраця є тим, чим забезпечується секс. Оскільки мітохондріальний геном накопичує мутації з більшою за ядерний геном швидкістю — приблизно в 10 разів швидше у ссавців — злагодженість між двома геномами поступово руйнується. Ми з нашими мітохондріями розходимося — і хоча винні в цьому мітохондрії, страждаємо ми. Секс компенсує цю дисгармонію, викидаючи нові комбінації більш сумісних із потребами мітохондрій ядерних генів.

Ось навіщо секс. Однак залишається дуже незрозумілим — як. Найпростіші еукаріоти — амеби — займаються сексом, розділивши навпіл геном, а потім розщепивши тіло-клітину із половиною геному в кожній частині; ці половинки амеби потім зливаються з іншими для створення нових особин. Отак відбувався перший секс.

Якщо максимально узагальнити, то це все досі відбувається так само. Секс просто означає розірвання геному навпіл і об'єднання його з іншим напівгеномом від когось іншого для створення нового цілого геному. Люди й більшість інших тварин досягають цього завдяки двом статям, одна з яких скидає свої напівгеноми в іншу через акт злягання.

Хто сказав, що романтика мертва?

ЕКСЦЕНТРИЧНИЙ ЛЮБОВНИЙ ТРИКУТНИК

З точки зору людини сексуальне розмноження — це справа, якою займаєшся сам-на-сам: є чоловіки, є жінки — й кожна зі сторін необхідна для народження дитини. Те саме стосується багатьох інших тварин і рослин, але ця система аж ніяк не є всезагальною. Деякі види глистів, губок, молюсків і рослин є гермафродитами, тобто будь-яка особина може паруватися з будь-якою іншою чи з самою собою. А в одного виду мурашок було визначено три статі — королева й два види самців. Королева повинна паруватися з першим типом, щоб робити робітників, а з другим — щоб робити королев. Тож загалом колонія є продуктом сексу втрьох.