

Nick Lane

# ZÁHADA ŽIVOTA

Proč je takový, jaký je?



argo / dokořán



Nick Lane

**ZÁHADA**

**ŽIVOTA**

**Proč je takový, jaký je?**

**ARGO / DOKOŘÁN**

Nick Lane

## **ZÁHADA ŽIVOTA**

**Proč je takový, jaký je?**

Copyright © 2015 Nick Lane

Translation © Pavel Pecháček, 2022

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této publikace nesmí být rozmnožována a rozšiřována jakýmkoli způsobem bez předchozího písemného svolení nakladatele.

Druhé vydání v českém jazyce (první elektronické).

Z anglického originálu *The Vital Question. Why Is Life the Way It Is?*

přeložil Pavel Pecháček.

Odpovědný redaktor Zdeněk Kárník.

Odborná revize Anton Markoš.

Redakce Marie Černá.

Obálka a sazba podle návrhu Pavla Růta

a konverze do elektronické verze Michal Puhač.

Vydalo v roce 2025 nakladatelství Dokořán, s. r. o.,

Holečkova 9, Praha 5,

dokoran@dokoran.cz, www.dokoran.cz,

jako svou 1 328. publikaci (459. elektronická).

**ISBN 978-80-7675-238-2**

Pro Anu,  
mou inspiraci a společníci  
na této magické cestě



# OBSAH

ÚVOD	Proč je život takový, jaký je?	9
<b>ČÁST I. PROBLÉM</b>		
KAPITOLA 1.	Co je život?	25
KAPITOLA 2.	Co to znamená žít?	53
<b>ČÁST II. VZNIK ŽIVOTA</b>		
KAPITOLA 3.	Energie v počátcích života	83
KAPITOLA 4.	Vznik buněk	111
<b>ČÁST III. KOMPLEXITA</b>		
KAPITOLA 5.	Vznik komplexních buněk	141
KAPITOLA 6.	Sex a původ smrti	169
<b>ČÁST IV. PŘEDPOVĚDI</b>		
KAPITOLA 7.	Moc a sláva	205
EPILOG	Z hlubin	239
	<i>Slovníček</i>	247
	<i>Poděkování</i>	255
	<i>Doporučená literatura</i>	261
	<i>Seznam ilustrací</i>	287
	<i>Rejstřík</i>	291



# PROČ JE ŽIVOT TAKOVÝ, JAKÝ JE?

V samém srdci biologie zeje černá díra. Řečeno bez obalu, nevíme, proč je život takový, jaký je. Veškerý komplexní pozemský život má společného předka: buňku, která během 4 miliard let vznikla pouze jednou, a to z jednoduchých bakteriálních předchůdců. Byla to mimořádná náhoda, anebo ostatní „experimenty“ v evoluci komplexity selhaly? Nevíme. Víme jen, že tento společný předek byl již velice složitou buňkou. Dosahoval víceméně stejné propracovanosti jako naše vlastní buňky a tuto značnou komplexitu nepředal pouze vám nebo mně, ale i všem svým potomkům, od stromů po včely. Zkuste se na jednu svou buňku podívat pod mikroskopem a porovnejte ji s buňkami houby. Jsou v podstatě totožné. Náš život se životu houby moc nepodobá, takže proč jsou naše buňky těm jejím tak podobné? Nejde jen o to, že vypadají prakticky stejně. Všechny komplexní život sdílí neuvěřitelný soubor složitých znaků, od sexu přes programovanou buněčnou smrt po senescenci, a žádný z nich nemá ekvivalentní protějšek u bakterií. Proč se u tohoto jediného předka nahromadilo tolik jedinečných vlastností nebo proč se ani u jedné z nich nezdá, že by se nezávisle vyvinula u bakterií? Na to neexistuje jednotný názor. Pokud všechny tyto znaky vznikly působením přírodního výběru, při němž každý krok poskytuje nějakou drobnou výhodu, proč se analogické znaky při jiných příležitostech neobjevily i u dalších skupin bakterií?

Tyto otázky podtrhují osobitou evoluční trajektorii pozemského života. Život se objevil zhruba půl miliardy let po vzniku Země, tedy asi před 4 miliardami let, ale poté se na více než dvě miliardy let, tedy skoro polovinu doby existence naší planety, zasekl na bakteriální úrovni komplexity. Bakterie ve skutečnosti zůstaly morfologicky (nikoli však biochemicky) jednoduché celé čtyři miliardy let. Ostře s nimi kontrastují všechny morfologicky složité organismy – rostliny, živočichové, houby, mořské řasy a jednobuněčná protista jako améba – které pocházejí z jediného společného předka, jenž žil před asi 1,5 až 2 miliardami let. Tím předkem byla zjevně „moderní“ buňka s vytríbenou vnitřní strukturou a bezprecedentní molekulární dynamikou, poháněná důmyslnými nanostroji kódovanými tisíci nových genů, jež se u bakterií z větší části nevyskytují. Nedochovaly se žádné

evoluční přechodné formy, žádné „chybějící články“, které by poskytly jakoukoli nápovědu k tomu, jak nebo proč tyto komplexní znaky vznikly. Místo nich máme jen nevysvětlitelnou propast, jež zeje mezi morfologickou jednoduchostí bakterií a úžasnou složitostí všeho ostatního. Evoluční černou díru.

Ročně utrácíme miliardy dolarů za biomedicínský výzkum, abychom se doptali odpovědi na nepředstavitelně složitou otázku, proč nás postihují nemoci. Do nejmenších detailů víme, jak spolu souvisejí geny a bílkoviny nebo jak jsou propojené různé regulační sítě. Vytváříme propracované matematické modely a navrhujeme počítačové simulace, abychom ověřili své předpovědi. Přesto stále nevíme, jak se dané buněčné součásti během evoluce vyvinuly. Jak můžeme doufat, že porozumíme nemoci, když vůbec netušíme, proč buňky fungují tak, jak fungují? Nemůžeme pochopit společnost, pokud nevíme nic o její minulosti, a stejně tak nemůžeme porozumět fungování buňky, pokud nevíme, odkud se v evoluci vzala. Nejde jen o praktickou stránku věci. Tyto otázky mají co do činění i s tím, proč tu vůbec jsme. Jaké zákony daly vzniknout vesmíru, hvězdám, Slunci, Zemi a samotnému životu? Dají tytéž zákony vzejít životu v celém vesmíru? Bude se mimozemský život podobat životu pozemskému? Podobné metafyzické otázky leží v samém jádru toho, co nás činí lidmi. Zhruba 350 let po objevu buňky stále netušíme, proč je život na Zemi takový, jaký je.

Možná jste si ani nevšimli, že to netušíme. Není to vaše chyba. Učebnice a časopisy překypují informacemi, ale vypořádat se s těmito „dětinskými“ otázkami se jim často nedaří. Internet nás zaplavuje nejrůznějšími nahodilými fakty, která jsou různou měrou promíchána s nesmysly. Problém však nespočívá pouze v informačním zahlcení. O černé díře v srdci předmětu svého zkoumání má většina biologů jen matné povědomí. Zabývají se jinými věcmi. Naprostá většina studuje velké organismy, konkrétní skupiny rostlin nebo živočichů. Poměrně málo se jich věnuje mikrobům, a ještě méně rané evoluci buněk. Roli hrají i obavy z kreationistů a inteligentního designu. Připustíme-li, že neznáme všechny odpovědi, riskujeme, že dáme prostor opozičníkům, popírajícím, že máme o evoluci jakékoli smysluplné povědomí. Samozřejmě, že máme. Víme toho neuvěřitelně hodně. Hypotézy o počátcích života a rané evoluci buněk musejí vysvětlit mohutný soubor faktů, vejít se do úzkých mantinelů našeho poznání a předpovídat neočekávané, avšak empiricky testovatelné vztahy. Velmi dobře rozumíme přírodnímu výběru a některým náhodnějším procesům, jež formují genomy organismů. Všechny tyto skutečnosti jsou v souladu s evolucí buněk. Jenže náš problém pramení přesně z těchto úzkých mantinelů vytyčených fakty. Nevíme, proč se život vydal právě tím směrem, jímž se vydal.

Vědci jsou zvědaví lidé, a pokud by byl tento problém tak zjevný, jak zde naznačujeme, byl by všeobecně známý. Ve skutečnosti není zjevný ani zdaleka. Různé konkurující si odpovědi jsou přístupné jen zasvěceným a jsou skoro stejně

mlhavé jako samotné otázky. Další potíž se skrývá v tom, že jednotlivá vodítka přicházejí z mnoha neslučitelných disciplín, od biochemie, geologie, fylogenetiky, ekologie a chemie až po kosmologii. Málokdo o sobě může tvrdit, že je na všechny tyto oblasti skutečný odborník. Nyní se navíc nacházíme uprostřed genomické revoluce. Máme k dispozici tisíce kompletních genomových sekvencí, kódů o milionech či miliardách písmen, které až příliš často obsahují protichůdné signály z hluboké minulosti. Interpretace těchto dat vyžaduje přísně logické, výpočetní a statistické znalosti. Jakékoli biologické porozumění je bonus. A tak se rozvířila mračna polemik. Kdykoli se rozevře nějaká mezera, odkrývá stále surreálnější krajinu. Staré výdobytky se postupně vytratily. Nyní hledíme na zcela nový obraz, který je reálný i znepokojivý a z pohledu badatele, jenž doufá nalézt a vyřešit nový důležitý problém, mimořádně vzrušující. Největší otázky biologie zůstávají nevyřešené a v této knize se pokusíme s tím začít něco dělat.

Co mají bakterie společného s komplexním životem? Počátky této otázky se datují už k objevu mikrobů nizozemským mikroskopikem Antonim van Leeuwenhoekem v 70. letech 17. století. Jeho sbírka „malých zvířátek“ prosperujících pod mikroskopem se setkala s nedůvěrou, ale brzy její existenci potvrdil podobně důvtipný Robert Hooke. Leeuwenhoek objevil i bakterie a ve slavném článku z roku 1677 o nich napsal, že jsou „neuvěřitelně malé, ba dokonce se mi jevíly tak malé, že i kdyby se vedle sebe naskládalo 100 těch velice drobounkých tvorů, soudím, že by nedosahovali ani délky zrnka hrubého písku. A pokud je to pravda, pak by se deset stotisíců těchto živých tvorů sotva vyrovnalo hromádce hrubozrnného písku.“ Mnozí pochybovali, že je možné, aby Leeuwenhoek spatřil bakterie jednoduchými jednoočkovými mikroskopy, dnes už je však nesporné, že to možné bylo. Podstatné jsou dvě věci. Bakterie našel všude – nejen na svých zubech, ale i v dešťové a mořské vodě. Navíc intuitivně rozlišoval mezi „velice drobounkými tvory“ a „gigantickými monstry“ – mikroskopickými protisty! – s jejich okouzlujícím chováním a „malinkýma nožkama“ (řasinky). Dokonce si všiml, že některé větší buňky se skládají z řady malých „kuliček“, jež přirovnával k bakteriím (byť ne těmito slovy). Mezi těmito malými kuličkami Leeuwenhoek zcela jistě spatřil buněčné jádro, v němž jsou uloženy geny všech složitých buněk. Poté se celá věc několik století nepohnula z místa. Slavný taxonom Carl Linné 50 let po Leeuwenhoekových objevech všechny mikroby bez ladu a skladu naházel do rodu *Chaos* (beztvaří) a kmene Vermes (červi). Hluboké rozdíly v 19. století znovu formálně potvrdil význačný německý evolucionista a Darwinův současník Ernst Haeckel, jenž bakterie oddělil od ostatních mikrobů. Z koncepčního hlediska ovšem nedošlo k výraznějšímu pokroku až do poloviny století dvacátého.

Záležitost vyvrcholila sjednocením biochemie. Bakterie se zprvu kvůli své ohromné metabolické virtuozitě jevíly jako nezařaditelné. Dokážou se živit

čímkoli od betonu přes akumulátorovou kyselinu po různé plyny. Jestliže tyto naprosto odlišné způsoby získávání potravy nemají nic společného, jak tedy bakterie vůbec rozřídit? A pokud je nedokážeme klasifikovat, jak bychom jim mohli porozumět? Stejně jako periodická tabulka vnesla soudržnost do chemie, vnesla biochemie řád do evoluce buněk. Albert Kluyver, další Nizozemec, ukázal, že pozoruhodná rozmanitost života stojí na podobných biochemických procesech. Společný základ mají například i tak rozdílné procesy jako dýchání, kvašení a fotosyntéza. Tato jednota naznačuje, že veškerý život pochází ze společného předka. To, co platí pro bakterii, platí podle Kluyvera i pro slona. Na biochemické úrovni hradba mezi bakteriemi a složitějšími buňkami téměř mizí. Bakterie jsou nesrovnatelně všestrannější, ale základní procesy, které je udržují naživu, jsou podobné. Nejvíce se snad k pochopení tohoto rozdílu přiblížili Kluyverovi studenti Cornelis van Niel a Roger Stanier: došli k závěru, že bakterie, stejně jako atomy, nelze rozložit na menší části, tedy že bakterie jsou nejmenší funkční jednotky. Mnoho bakterií může kupříkladu stejně jako my dýchat kyslík, ale je k tomu potřeba celá bakterie. Na rozdíl od našich buněk nemá bakterie žádné vnitřní části specializované na dýchání (dýcháním v textu zpravidla myslíme dýchání buněčné). Když bakterie vyrostou, rozdělí se, ale z funkčního hlediska jsou nedělitelné.

Poté přišla první ze tří velkých revolucí, jež v uplynulém půlstoletí zničily náš pohled na život. Tu první vyvolala během léta lásky v roce 1967 Lynn Margulisová. Ta tvrdila, že se komplexní buňky nevyvinuly „standardním“ přírodním výběrem, ale ve víru spolupráce, během něž se buňky navzájem propojily tak těsně, že se nakonec jedna ocitla uvnitř druhé. Symbióza je označení pro dlouhodobou interakci mezi dvěma či více druhy, která má obvykle podobu směny zboží nebo služeb. V případě mikrobů jsou zbožím látky vznikající při metabolismu, které pohánějí život buněk. Margulisová mluvila o *endosymbióze*, obchodu založenému na stejném principu, jenž je ale v tomto případě natolik důvěrný, že některé kooperující buňky fyzicky žijí uvnitř buněk hostitelských, a připomínají tak obchodníky prodávající zboží uvnitř chrámu. Kořeny této myšlenky sahají do počátku 20. století a připomínají situaci kolem deskové tektoniky. Afrika a Jižní Amerika vypadají, jako by byly kdysi spojené a poté se rozdělily, avšak tato dětinská představa byla dlouho považována za absurdní. Podobně některé vnitřní struktury komplexních buněk vyhlížejí jako bakterie, a dokonce se zdá, že rostou a dělí se nezávisle na celku. Možná je vysvětlení skutečně jednoduché – jde o bakterie!

Stejně jako u deskové tektoniky i tyto myšlenky předběhly svou dobu a přesvědčivé důkazy nešlo předložit dříve než v éře molekulární biologie v 60. letech 20. století. Margulisová jimi doložila existenci dvou specializovaných struktur uvnitř buněk: mitochondrií, v nichž probíhá dýchání, respektive spalování

potravy za přítomnosti kyslíku, jež poskytuje energii nezbytnou pro život, a chloroplastů, motorů fotosyntézy, které v rostlinných buňkách přeměňují sluneční energii v energii chemickou. Obě „organely“ (doslova miniaturní orgány) si zachovávají vlastní drobný specializovaný genom, v němž se nachází hrstka genů kódujících nanejvýš pár desítek bílkovin zapojujících se do mechanismu dýchání či fotosyntézy. Sekvence těchto genů nakonec odhalily celou pravdu – mitochondrie a chloroplasty svůj původ nepochybně odvozuji od bakterií. Všimněte si však, že jsem použil slovo „odvozuji“. Už to nejsou bakterie a nejsou skutečně nezávislé, jelikož naprostá většina genů, jež ke své existenci potřebují (je jich přinejmenším 1 500), se nalézá v jádru, genetickém „řídícím centru“ buňky.

Margulisová měla s mitochondriemi a chloroplasty pravdu. V 80. letech zbývalo už jen pár pochybovačů. Uvažovala ovšem v mnohem větších rozměrech. Podle ní byla směsí vzniklou symbiózou celá komplexní buňka, dnes všeobecně známá jako buňka *eukaryotická* či *eukaryotní* (název odkazuje na řecký výraz pro „pravé jádro“). Margulisová věřila, že bakteriální původ mají i mnohé jiné části eukaryotické buňky, zejména bičíky a řasinky (Leeuwenhoekovy „malinké nožky“), jež mohly vzniknout ze spirochét. Postupně prý došlo k celé řadě splynutí, což formálně nazvala „teorie sériové endosymbiózy“. A nešlo jen o buňky. Podle hypotézy „Gaia“, kterou Margulisová razila spolu s Jamesem Lovelockem, je veškerý svět ohromnou sítí vytvořenou spolupracujícími bakteriemi. Ačkoli koncept Gaii se v posledních letech objevuje ve formálnějším hávu „vědy o zemských systémech“ (zbavuje se tak původní Lovelockovy teleologie), představa, že komplexní „eukaryotické“ buňky jsou souborem bakterií, má mnohem menší podporu. Většina buněčných struktur nevypadá odvozená od bakterií a ani v genech není nic, co by tomu nasvědčovalo. Margulisová tedy měla v některých ohledech pravdu a v jiných se zcela mylila. Nicméně její bojovný duch, energická ženská, nezájem o darwinovské soupeření a sklon věřit konspiračním teoriím způsobily, že když v roce 2011 předčasně zemřela na mrtvici, zanechala po sobě značně smíšený odkaz. Pro některé byla feministickou hrdinkou, pro jiné nepředvídatelným živlem. Velká část jejího odkazu byla vědě bohužel velmi vzdálená.

Revolucí číslo dvě byla revoluce fylogenetická, která umožnila sledovat původ genů. Tuto možnost předvídal Francis Crick už v roce 1958. S typickou sebejistotou napsal: „Biologové by si měli uvědomit, že brzy bude existovat obor, který bychom mohli nazvat ‚taxonomií bílkovin‘ – studium aminokyselinových sekvencí bílkovin organismu a jejich porovnávání mezi druhy. Lze se domnívat, že tyto sekvence jsou nejjemnějším možným vyjádřením fenotypu organismu a že se v nich může ukrývat ohromné množství evolučních informací.“ A kupodivu k tomu opravdu došlo. Biologie se dnes velice intenzivně zabývá informacemi ukrytými v sekvencích bílkovin a genů. Dnes neporovnáváme přímo pořadí aminokyselin, ale pořadí písmen v DNA (ve které jsou zakódovány bílkoviny), čímž

dosahujeme ještě větší citlivosti. Nicméně ani přes všechnu svou prozíravost si Crick ani nikdo jiný neuměl představit, jaká tajemství geny skutečně prozradí.

„Ošlehaným revolucionářem“ mikrobiologie se stal Carl Woese. V rámci výzkumu, jenž nenápadně začínal v 60. letech a ovoce přinesl teprve o deset let později, Woese vybral jeden gen a porovnával jej napříč druhy. Musel to být gen, který se vyskytuje u všech druhů, a navíc bylo potřeba, aby u všech druhů sloužil téměř účelu. Bylo nezbytné, aby šlo o účel pro buňku natolik základní a důležitý, že by přírodní výběr potrestal i nepatrné změny v jeho funkci. Pokud se většinou změn zabránil, zbude něco, co musí být relativně neměnné, co se vyvíjelo extrémně pomalu a během dlouhých věků se jen velmi málo měnilo. Právě to je nutné, pokud chceme porovnávat rozdíly, které se mezi druhy přesto nahromadily doslova za miliardy let, abychom vytvořili mohutný strom života vracející se až k jeho počátkům. Přesně tento cíl si Woese vytknul. S vědomím všech těchto požadavků obrátil pozornost k základní vlastnosti všech buněk, schopnosti vyrábět bílkoviny.

Bílkoviny neboli proteiny se skládají v pozoruhodných nanostrojích, jež se nacházejí ve všech buňkách a jimž se říká ribozomy. S výjimkou ikonické dvoušroubovice DNA nic nesymbolizuje informační věk biologie tolik jako ribozom. Jeho struktura ztělesňuje problém, s nímž se lidská mysl jen těžko potýká, tedy s měřítkem. Ribozom je nepředstavitelně titěrný. Už samotné buňky jsou mikroskopické. Většinu lidské historie jsme o jejich existenci neměli ani potuchy. Ribozomy jsou ještě o několik řádů menší. V každé jaterní buňce jich máte 13 milionů! Ribozomy ale nejsou jen neuvěřitelně malé. Na úrovni atomů jsou to masivní, sofistikované superstruktury. Skládají se z nespočtu mohutných podjednotek, pohyblivých strojních součástí, jež fungují s mnohem větší přesností než automatizovaná tovární linka. Bez nadsázky. Přes ribozomy se posouvá „telegrafní páska“ s informací, která kóduje jednotlivé bílkoviny, a ribozomy její sekvenci přesně písmenko po písmenku překládají do bílkoviny. Za tímto účelem verbují potřebné stavební kameny (aminokyseliny) a v pořadí specifikovaném dědičným kódem je spojují do dlouhého řetězce. Míra chybovosti se u ribozomů pohybuje kolem jednoho písmena na 10 000, a je tak daleko nižší než u našich nejkvalitnějších výrobních procesů. Navíc pracují rychlostí asi 10 aminokyselin za sekundu, takže celou bílkovinu sestávající ze stovek aminokyselin postaví za méně než minutu. Woese si vybral jednu podjednotku ribozomu, dalo by se říct jednu část stroje, a její sekvenci porovnal napříč různými druhy, od bakterií jako *E. coli* přes kvasinky po člověka.

Jeho závěry zapůsobily jako zjevení a přivodily zásadní obrat v našem světovém názoru. Snadno rozlišoval mezi bakteriemi a komplexními eukaryoty a vytvořil rozvětvený strom genetické příbuznosti uvnitř těchto určujících skupin i mezi nimi. Jediným překvapením bylo, jak malé rozdíly panují mezi rostlinami,

živočichy a houbami, jejichž studiem většina biologů strávila podstatnou část života. Co nikdo nečekal, byla existence třetí domény života. Některé jednoduché buňky, jež do ní patří, byly známy celá staletí, ale mylně byly považovány za bakterie. Ony totiž jako bakterie vypadají. Úplně přesně jako bakterie: stejně jako ony jsou drobné a stejně jako ony postrádají zřetelnou strukturu. Jejich ribozomy však navzdory podobnému zevnějšku poukázaly na obrovské rozdíly. Nové skupině se sice nedostávalo komplexnosti eukaryot, ale geny a bílkoviny, jimiž disponovala, se od těch bakteriálních ohromně lišily. Tato druhá skupina jednoduchých buněk vešla ve známost jako *archea* (Archaea), a to v předtuše, že jsou ještě starší než bakterie, což patrně není pravda. Podle současných názorů jsou obě skupiny stejně staré. Na úrovni genů a biochemických pochodů je však propast mezi bakteriemi a archei zrovna tak hluboká jako propast mezi bakteriemi a eukaryoty (námi). Skoro doslova. Na slavném Woeseově stromu života se třemi doménami jsou *archea* a eukaryota „sesterské skupiny“, které mají relativně nedávného společného předka.

V některých ohledech toho mají eukaryota a *archea* opravdu hodně společného, zejména co se týče informačního toku (způsobu, jakým čtou své geny a přetvářejí je do bílkovin). *Archaea* mají několik sofistikovaných molekulárních strojů podobajících se svým protějškům u eukaryot, byť se skládají z menšího množství dílů – disponují tedy jakýmsi zárodky eukaryotické komplexity. Woese odmítl připustit jakoukoli hlubokou morfologickou propast mezi bakteriemi a eukaryoty a předložil tři rovnocenné domény, z nichž každá pokrývala rozsáhlou oblast evolučního prostoru a žádná neměla přednost před ostatními. Jeho nejzávažnějším krokem bylo zavrnutí starého termínu „prokaryota“ (který doslova znamená „předjaderní“ a lze jej vztáhnout na bakterie i *archea*). Jeho strom totiž pro takové dělení neskýtal žádné genetické opodstatnění. Všechny tři domény naopak zobrazil tak, že zasahovaly do nejhlubší minulosti, kde sdílejí tajemného společného předka, z něž nějakým způsobem „vykrytalizovaly“. Krátce před smrtí se Woese začal o těchto raných fázích evoluce vyjadřovat téměř mysticky a volal po holističtějším pohledu na život. Působí to trochu ironicky, neboť revoluce, kterou zažehl, se zakládala na zcela redukcionistické analýze jediného genu. Není pochyb, že bakterie, *archea* a eukaryota jsou opravdu odlišné skupiny a Woeseova revoluce byla skutečná. Avšak jeho recept na holismus, tedy nutnost brát v úvahu celé organismy a kompletní genomy, v současné době ohlašuje příchod třetí buněčné revoluce, která tu Woesevu svrhává.

Třetí revoluce ještě neskončila. V úvahách je trochu decentnější, ale její dopad je o to větší. Pramení z prvních dvou revolucí a zejména z otázky, jak spolu souvisejí. Woeseův strom zachycuje odchylování jednoho důležitého genu ve třech doménách života. Naproti tomu u Margulisové máme geny z různých druhů, které se během endosymbiotických fúzí a akvizic sbíhají. Když to znázorníme

v podobě stromu, místo rozdvojování větví spatříme jejich splývání – opak stromu, který předložil Woese. Oba přece nemohou mít pravdu! Ale ani se oba nemusí zcela mýlit. Jak už tomu tak ve vědě často bývá, pravda leží někde uprostřed. Nemyslete si však, že řešením je kompromis. Formulující se odpověď je více vzrušující než každá z alternativ.

Víme, že mitochondrie a chloroplasty skutečně vznikly z bakterií endosymbiózou a jiné části eukaryotických buněk se pravděpodobně vyvinuly konvenčněji. Otázka zní: kdy přesně se to stalo? Chloroplasty se nacházejí pouze u řas a rostlin, a s největší pravděpodobností je tak získal pouze společný předek obou skupin.\* To z nich dělá relativně pozdní akvizici. Oproti tomu mitochondrie najdeme u všech eukaryot (pojí se s tím příběh, který prozkoumáme v 1. kapitole), takže musejí představovat dřívější akvizici. Ale o kolik dříve to bylo? Nebo jinak, jaký druh buňky polapil mitochondrii? Podle klasického učebnicového pohledu to byla poměrně sofistikovaná buňka, něco jako améba, predátor, který se dokázal pohybovat, měnit tvar a pohlcovat jiné buňky pomocí takzvané fagocytózy. Jinak řečeno, mitochondrii si osvojila buňka, která neměla daleko k plně vyvinutému, řádnému eukaryotickému organismu. Dnes víme, že to není pravda. Porovnání velkého množství genů u reprezentativnějších druhů, jež proběhlo v posledních letech, přineslo jednoznačný závěr, a sice že hostitelská buňka ve skutečnosti patřila do domény archea. Všechna archea jsou prokaryota. Z definice jim chybí jádro, neprovozují sex a nemají ani žádné jiné vlastnosti komplexního života, včetně schopnosti provozovat fagocytózu. Co se týče morfologické komplexity, neměla z ní hostitelská buňka k dispozici téměř nic. Nato do ní nějak pronikla bakterie, z níž se stala mitochondrie. Všechny tyto komplexní znaky se u ní vyvinuly teprve *poté*. Pokud tomu tak opravdu je, vznik komplexního života možná *závisel* na osvojení mitochondrií, které jeho zrod nějakým způsobem odstartovaly.

Nástup tohoto radikálního názoru, tedy že komplexní život vznikl v důsledku ojedinelé endosymbiotické události mezi archeální hostitelskou buňkou a bakterií, z níž se stala mitochondrie, předpověděl v roce 1998 Bill Martin, volnomyšlenkářský biolog s brilantní intuicí, na základě pozoruhodné a do značné míry jím samým objevené mozaiky genů v eukaryotické buňce. Podívejme se na jednu konkrétní biochemickou dráhu, například fermentaci (kvašení). Archea k tomu používají jednu metodu a bakterie zcela jinou. Geny, jež se do procesu zapojují, se liší. Eukaryota si vzala několik genů od bakterií, pár dalších od archeí a upletla

---

\* Dodejme, že řasy jsou seskupením nepříbuzných skupin organismů, z nichž některé patří mezi zelené rostliny, ale jiné, například chaluhy, mezi ně nepatří, a některé chloroplasty nezískaly endosymbiózou přímo z bakterií, ale pohlcením již fotosyntetizujícího eukaryotického organismu, který se stal sekundárním, nebo dokonce terciárním či vyšším chloroplastem. (Pozn. překl.)

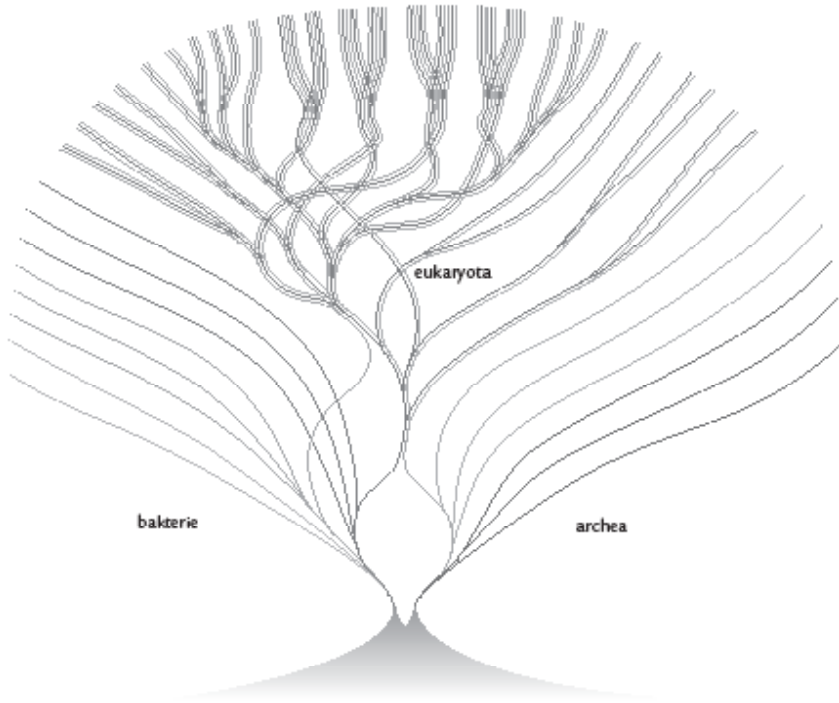
z nich úzce propojenou kompozitní dráhu. Toto komplikované spojení genů do jednoho souboru se nevztahuje jen na kvašení, ale na téměř všechny biochemické procesy probíhající v eukaryotických buňkách. Vskutku skandální situace!

Martin vše promyslel do nejmenších detailů. Proč si hostitelská buňka od svých endosymbiontů vzala tolik genů a proč je do svého systému začlenila natolik pevně, že při tom dokonce nahradila mnoho svých již existujících genů? Odpovědi, kterou Martin formuloval s Miklósem Müllerem, se přezdívá vodíková hypotéza. Martin a Müller vyslovili názor, že hostitelská buňka byla archeonem, který se dokázal živit dvěma jednoduchými plyny, vodíkem a oxidem uhličitým. Endosymbiont (budoucí mitochondrie) byl všestrannou bakterií (což je u bakterií zcela běžné) a hostitelské buňce dodával vodík potřebný k růstu. Detaily tohoto vztahu, krok za krokem odvozené logickou dedukcí, vysvětlují, proč buňka, která se na počátku živila jednoduchými plyny, nakonec skončila u konzumace organických látek, jimiž zásobovala vlastní endosymbionty. To ale teď není důležité. Nejpodstatnější je Martinova předpověď, že komplexní život vznikl ojedinělou endosymbiózou mezi pouhými dvěma buňkami. Předpověděl, že hostitelská buňka byla archeon, jenž postrádal okázalou složitost eukaryotických buněk. Předpověděl, že neexistoval žádný mezičlánek, jednoduchá eukaryotická buňka postrádající mitochondrie, tedy že získání mitochondrie a počátek komplexního života byly jednou a toutéž událostí. A předpověděl, že všechny propracované znaky eukaryotických buněk, od jádra přes sex po fagocytózu, se vyvinuly teprve *po* získání mitochondrií, jež souviselo s onou jedinečnou endosymbiotickou událostí. Jedná se o jeden z nejúžasnějších postřehů evoluční biologie a zaslouží si, aby se o něm všeobecně vědělo. A vědělo by se, kdyby nebyl tak snadno zaměnitelný s teorií sériové endosymbiózy (která, jak uvidíme, nepřichází s tímiž předpověďmi). Všechny tyto jasně vyjádřené predikce v posledních dvou desetiletích plně potvrdilo zkoumání genomů. Zářně to ukazuje, jak mocná je biochemická logika. Pokud by se udělovala Nobelova cena za biologii, nikdo by si ji nezasloužil víc než Bill Martin.

A tím jsme se dostali zase na začátek. Víme toho strašně moc, ale stále nevíme, proč je život takový, jaký je. Víme, že eukaryotické buňky vznikly během čtyř miliard let evoluce jednou jedinkrát, důsledkem ojedinělé endosymbiózy mezi archeální buňkou a bakterií (obrázek 1). Víme, že znaky typické pro komplexní život vznikly po tomto spojení, ale dosud netušíme, proč se tyto konkrétní rysy objevily u eukaryot, kdežto u bakterií a archeí žádné známky jejich evoluce nepozorujeme. Nevíme, jaké síly omezují bakterie a archea, proč obě skupiny zůstávají morfologicky jednoduché, přestože se z biochemického hlediska výrazně liší, mají velmi rozmanité geny, jsou mimořádně všestranné a získávají energii k životu z plynů či hornin. Získali jsme zcela nový rámeček, v němž můžeme tento problém uchopit.

Věřím, že klíč se skrývá v neobvyklém mechanismu výroby biologické energie v buňkách. Tento podivný mechanismus uvaluje na buňky všudypřítomná, avšak málo doceněná fyzikální omezení. V podstatě všechny živé buňky ke svému pohonu využívají tok protonů (kladně nabitých atomů vodíku), což je něco jako elektrina, jen s protony místo elektronů. Energie získávaná spalováním potravy při (buněčném) dýchání je využita k pumpování protonů přes membránu, čímž na jedné její straně vznikne jakýsi protonový rezervoár. Tok protonů z rezervoáru zpět přes membránu lze využít jako zdroj energie pro práci stejným způsobem, jakým funguje turbína ve vodní elektrárně. Využívání protonového gradientu napříč membránami k pohonu buněk bylo naprosto nečekané. Tato představa, kterou v roce 1961 poprvé navrhl a následující tři desetiletí rozvíjel Peter Mitchell, jeden z neoriginálnějších vědců 20. století, byla označena za nejméně intuitivní biologickou myšlenku od Darwinových dob a za jedinou, která se vyrovná Einsteinovým, Heisenbergovým a Schrödingerovým myšlenkám ve fyzice. Dnes máme podrobnou představu o fungování protonového pohonu na úrovni bílkovin. Víme také, že využívání protonových gradientů je všeobecně rozšířené napříč pozemským životem, neboť protonový pohon je stejně nedílnou součástí života jako univerzální genetický kód. Přesto nevíme v podstatě nic o tom, jak nebo proč tento neintuitivní mechanismus využívání energie vznikl. Domnívám se proto, že v samém srdci současné biologie se skrývají dvě zásadní nezodpovězené otázky: proč se život vyvíjel tak podivně, jak se vyvíjel, a proč jsou buňky poháněny tak zvláštním způsobem, jaký jsme právě vylíčili.

Naše kniha se na tyto otázky, jež jsou nejspíše úzce propojené, pokouší odpovědět. Snad vás přesvědčí, že energie je ústředním prvkem evoluce a že životu můžeme porozumět, pouze pokud do rovnice přidáme energii. Pokusíme se ukázat, že vztah mezi energií a životem se traduje od jeho samých počátků, že se základní vlastnosti života nutně vynořily z nerovnováhy neklidné planety. Pokusíme se ukázat, že vznik života byl poháněn energetickým tokem, že protonové gradienty hrály klíčovou roli při zrození buněk a že jejich využíváním vznikla omezení ovlivňující strukturu bakterií i archeí. Pokusíme se doložit, že tato omezení významně ovlivňovala pozdější evoluci buněk a zapříčinila, že bakterie i archea bez ohledu na svou biochemickou virtuozitu navždy zůstaly morfologicky jednoduchými skupinami. Pokusíme se dokázat, že endosymbióza – vzácná událost, při níž se do archeální buňky dostala jistá bakterie – tato omezení prolomila a umožnila evoluci nesrovnatelně složitějších buněk. Pokusíme se ukázat, že to nebylo snadné – že důvěrný vztah mezi buňkami, při němž jedna žije uvnitř druhé, vysvětluje, proč morfologicky komplexní organismy vznikly pouze jednou. Snad dojdete k přesvědčení, že tento intimní vztah ve skutečnosti předpovídá některé vlastnosti komplexních buněk. Mezi ně patří přítomnost jádra, sex, dvě pohlaví, a dokonce i rozdíl mezi nesmrtelnou zárodečnou linií



**Obr. 1:** Strom života znázorňující chimérický původ eukaryotických buněk. Složený strom beroucí v úvahu celé genomy, jak jej v roce 1998 vyobrazil Bill Martin, obsahuje tři domény: bakterie, archea a eukaryota. Eukaryota mají chimérický původ. Propojily se u nich geny z archeální hostitelské buňky a bakteriálního endosymbionta. Archeální hostitelská buňka se nakonec vyvinula v morfologicky komplexní eukaryotickou buňku a endosymbiont v mitochondrii. Jedna skupina eukaryot později získala druhého bakteriálního endosymbionta, z něž se staly chloroplasty u řas a rostlin.

a smrtelným tělem (tento rozdíl je příčinou omezené délky života a geneticky predeterminované smrti). A nakonec se možná přesvědčíte, že když budeme o těchto otázkách uvažovat z hlediska energie, umožní nám to předpovědět některé aspekty fungování našich vlastních těl, zejména hluboký evoluční kompromis mezi plodností a biologickou zdatností v mládí na jedné straně a stárnutím a nemocemi na straně druhé. Lze věřit, že nám tyto poznatky pomohou zlepšit naše zdraví, nebo mu přinejmenším lépe porozumět.

Vystupování v roli advokáta vědy se může setkat s nevolí, ale v biologii má přesně tento postup dlouhou tradici, která se táhne až k samotnému Darwinovi. Svě dílo *O vzniku druhů* nazval „jedním dlouhým důkazem“. Kniha stále skýtá nejlepší možnost, jak vyložit svůj pohled na vzájemné souvislosti mezi fakty napříč

vědeckým poznáním, jak představit hypotézu, která smysluplně vysvětluje povahu skutečnosti. Peter Medawar hypotézu popsal jako myšlenkový skok do neznáma. Jakmile takový skok učiníme, stane se hypotéza pokusem odvyprávět příběh, jenž by byl z lidského úhlu pohledu srozumitelný. Aby byla hypotéza vědecká, musí vytvářet testovatelné předpovědi. Ve vědě není větší urážky než prohlásit, že argument „není dokonce ani špatný“, vždyť jej nelze vůbec vyvrátit. V této knize proto předložím hypotézu – koherentní příběh – která propojuje energii s evolucí. Udělám to natolik detailně, aby ji bylo možné vyvrátit, zároveň však budu psát natolik přístupným a strhujícím stylem, jak jen dovedu. Tento příběh se zčásti zakládá na mém vlastním výzkumu (původní vědecké články najdete v Doporučené literatuře) a zčásti na výzkumu jiných badatelů. Nejplodnější byla má spolupráce s Billem Martinem, jenž působí v Düsseldorfu a který, jak jsem zjistil, disponuje až pozoruhodnou schopností mít pravdu, a Andrewem Pomiankowským, matematicky založeným evolučním genetikem a mým nejlepším kolegou z University College London. Zapomenout nesmím ani na několik mimořádně schopných doktorandů. Bylo mi ctí a obrovským potěšením. Jsme však teprve na začátku úžasné cesty.

Snažil jsem se, aby kniha zůstala stručná, mluvila k věci a neobsahovala příliš odboček a zajímavých, avšak nesouvisejících příběhů. Předkládá argumenty tak strohé či podrobné, jaké jsou potřeba. Nechybí v ní metafory a (doufejme) vzrušující detaily, což je nesmírně důležité, má-li být text o biochemii zajímavý pro běžného čtenáře. Jen málokdo si umí představit nezvyklou submikroskopickou krajinu obrovských interagujících molekul, jež jsou základem života. Hlavní je ovšem samotná věda, což ovlivňovalo můj styl psaní. Nazývat věci pravým jménem je stará osvědčená ctnost. Je to stručné a přivádí nás to přímo k jádru věci. Kdybychom si vždy po několika stranách připomínali, co ten který termín vlastně znamená, brzy by vám to začalo vadit. Byť není zrovna vstřícné nazývat mitochondrii mitochondrií, bylo by těžkopádné psát: „Všechny velké, eukaryotické buňky jako ty naše obsahují miniaturní elektrárny, jež kdysi dávno vznikly z volně žijících bakterií a které nám dnes poskytují v podstatě veškerou energii, již potřebujeme.“ Místo toho raději napíšeme: „Všechna eukaryota mají mitochondrie.“ Je to srozumitelnější a silněji to zapůsobí. Pokud se spokojíte s několika termíny, sdělí vám více informací, a sice tak stručně, že okamžitě vybědnou k otázce, jak k tomu došlo? To nás vede přímo na hranici neznáma a k té nejzajímavější části vědy. Snažil jsem se proto vyhnout nadbytečnému žargonu a v textu tu a tam vysvětlil některé pojmy. Kromě toho ale doufám, že si opakované termíny osvojíte. Pro jistotu je na konci knihy ještě krátký slovníček nejdůležitějších pojmů. Doufejme, že s občasným ověřením termínů bude kniha bez problémů přístupná každému zájemci.

A upřímně také doufám, že vás to bude zajímat! Navzdory vši své podivnosti je tento krásný nový svět fascinující – myšlenky, možnosti, počátky porozumění,

kde v nekonečném vesmíru je naše místo. Načrtneme si obrysy nové a do značné míry neprobádané krajiny, představíme si perspektivu, která sahá od samotných počátků života po naše zdraví a smrtelnost. Tohoto ohromného rozpětí dosáhneme sjednocením několika jednoduchých myšlenek, jež souvisejí s protonovými gradienty napříč membránami. Už od Darwina byly nejlepšími biologickými knihami ty argumentační. Ta naše se na tuto tradici snaží navázat. Budeme v ní tvrdit, že energie vytvářela omezení pro evoluci pozemského života, že stejné síly by měly platit kdekoli ve vesmíru, že syntéza energie a evoluce by se mohla stát základem prediktivnější biologie a pomoci nám pochopit, proč je život takový, jaký je - nejen na Zemi, ale všude ve vesmíru, kde by mohl existovat.



ČÁST I.

# PROBLÉM



# CO JE ŽIVOT?

Radioteleskopy dnem i nocí upřeně prozkoumávají oblohu. V severokaliifornském pohoří jich je mezi nízkými keříky roztroušených dvačtyřicet. Jejich bílé miskovité antény připomínají prázdné tváře, které se plny naděje upírají na jeden společný bod kdesi za obzorem. Působí to tam jako shromaždiště pro mimozemské vetřelce, kteří se pokoušejí vrátit domů. Ten nesoulad je výstižný. Teleskopy jsou součástí projektu SETI na hledání mimozemské inteligence, který už půl století zkoumá oblohu a (bezvýsledně) pátrá po známkách života. Jeho šance na úspěch nevidí příliš optimisticky ani zastánci projektu, ale když před několika lety vyschly finanční zdroje, přímý apel na veřejnost uvedl soustavu Allenových radioteleskopů znovu do provozu. Podle mého názoru tento počín trefně symbolizuje nejistotu lidstva ohledně našeho místa ve vesmíru, a vlastně i křehkost samotné vědy. Jde o vědecko-fantastické technologie tak neproniknutelné, že hraničí s vševědoudcností, zaměřené na sen tak naivní, že to v podstatě nemá nic společného s vědou - na sen, že nejsme sami.

I kdyby soustava SETI život nikdy nenašla, přesto je cenná. Možná se těmito teleskopy nemá cenu dívat, avšak právě v tom je jejich skutečná síla. Po čem přesně tam venku vlastně pátráme? Měl by se život jinde ve vesmíru podobat tomu pozemskému natolik, že by i on používal rádiové vlny? Myslíme si, že by se měl život jinde zakládat na uhlíku? Potřeboval by vodu? Kyslík? Tohle ve skutečnosti nejsou otázky o podobě života někde jinde ve vesmíru. Týkají se totiž života na Zemi - proč je takový, jak ho známe. Tyto teleskopy jsou zrcadla, která své otázky odrážejí zpět k biologům tady na Zemi. Problém je, že ve vědě jde v první řadě o předpovědi. Nejpalcivější otázky fyziky se týkají toho, proč jsou fyzikální zákony takové, jaké jsou: jaké fundamentální principy předpovídají známé vlastnosti vesmíru? Biologie je méně prediktivní a nemá žádné zákony srovnatelné s těmi fyzikálními. Prediktivní síla evoluční biologie je až trapně chabá. Víme toho opravdu hodně o molekulárních mechanismech evoluce a o historii života na naší planetě, ale daleko méně o tom, které jejich části jsou náhodné, a mohly se tedy na jiných planetách odvíjet zcela odlišně, a které byly předurčeny fyzikálními zákony nebo omezeními.

Nedá se říct, že bychom se málo snažili. Tyto končiny jsou oblíbenou oblastí zájmu penzionovaných nositelů Nobelových cen a jiných významných postav biologie. Avšak i přes veškeré své znalosti a intelekt nejsou schopni se shodnout.

Před čtyřiceti lety, na počátku éry molekulární biologie, napsal francouzský biolog Jacques Monod knihu *Náhoda a nutnost*, kde sklíčeně tvrdí, že vznik života na Zemi byl neobyčejnou náhodou a že jsme v celém prázdném vesmíru sami. Poslední řádky jeho knihy nemají daleko k poezii. Jsou směsí vědy a metafyziky:

Stará smlouva je zrušena. Člověk konečně ví, že dlí sám v lhostejné nesmírnosti vesmíru, z níž povstal náhodou. Jeho úkol je předurčen stejně málo jako jeho účel. Stojí před nutností volit mezi královstvím a temnotou.\*

Mezitím přišli jiní, kteří tvrdili opak, tedy že život je nevyhnutelným důsledkem látkových proměn v kosmu. Objeví se rychle a skoro všude. Když už začne na planetě vzkvétat, co se stane potom? Ani na tom nepanuje shoda. Technická omezení mohou život natlačit do sbíhajících se drah vedoucích k podobným výsledkům, bez ohledu na to, kde začal. Kvůli gravitaci jsou například létající zvířata spíše lehká a disponují něčím na způsob křídel. Obecněji vzato může být nezbytné, aby měl život buněčnou povahu, aby se skládal z malých jednotek, jež si v sobě udržují odlišné podmínky, než jaké panují v okolním světě. Pokud jsou tím nejdůležitějším tato omezení, mohl by život kdekoli jinde silně připomínat život na Zemi. Nebo může naopak hrát prim náhoda - povaha života bude záviset na nahodilých přeživších globálních katastrof, jakou byl například dopad asteroidu, který vyhubil dinosaury. Přetočme hodiny zpátky o půl miliardy let, na začátek kambria, kdy se ve fosilním záznamu náhle objevilo velké množství různých druhů živočichů, a nechme čas zase plynout. Podobal by se tento paralelní svět tomu našemu? Třeba by se kopce hemžily obřími suchozemskými chobotnicemi.

Jedním z důvodů, proč namířit teleskopy do vesmíru, je skutečnost, že tady na Zemi máme k dispozici vzorek života o velikosti jednoho exempláře. Ze statistického hlediska nelze říct, co určovalo evoluci pozemského života, jestli vůbec něco takového bylo. Pokud by to ale byla pravda, neměla by tato ani žádná jiná kniha důvod existovat. Fyzikální zákony platí v celém vesmíru, a stejně tak se nemění vlastnosti nebo množství různých prvků, tedy ani možnosti chemických proměn. Život na Zemi má mnoho podivných vlastností, jež po staletí napínaly mysl nejlepší biologů - jde o vlastnosti jako sex nebo stárnutí. Kdybychom na základě prvotních principů či na základě chemické povahy vesmíru dokázali předpovědět, proč tyto vlastnosti vznikly, proč je život takový, jaký je, mohli bychom znovu vstoupit do světa statistické pravděpodobnosti. Pozemský život ve skutečnosti není vzorkem o jednom exempláři. Prakticky vzato kypí nezměrnou rozmanitostí organismů, které se nesmírně dlouho vyvíjely. Evoluční teorie nicméně na základě prvotních principů nepředpovídá, proč se život na Zemi vydal

\* Překlad Zdeněk Žáček, Zdeněk Neubauer a Anton Markoš.

směrem, jímž se vydal. Tím nemáme na mysli, že je evoluční teorie chybná - není chybná - ale jednoduše že není prediktivní. V této knize představíme argument, že existují zásadní omezení, která ovlivňují běh evoluce, energetická omezení, jež nám na bázi prvotních principů umožňují předpovědět některé z nejzákladnějších rysů života. Než se budeme těmito omezeními moci zabývat, musíme se zamyslet nad tím, proč evoluční biologie není prediktivní a proč energetická omezení zůstala víceméně bez povšimnutí, respektive proč nám téměř uniklo, že je tu nějaký problém. Teprve v posledních několika letech si lidé zabývající se evoluční biologii začali neúprosně uvědomovat, že se v samém srdci biologie nachází znepokojivá diskontinuita.

Do jisté míry můžeme tento neuspokojivý stav dávat za vinu DNA. Ironií je, že na počátku moderní éry molekulární biologie a úžasných DNA technologií, které se s ní pojí, pravděpodobně stojí fyzik Erwin Schrödinger, konkrétně jeho kniha *Co je život?* publikovaná v roce 1944. Schrödinger zdůraznil dvě klíčové věci: zaprvé, že život nějakým způsobem vzdoruje všeobecnému tíhnutí k rozkladu, respektive zvyšování entropie (neuspořádanosti), které je vyžadováno druhým termodynamickým zákonem. A za druhé, že trik, jímž se život na lokální úrovni vyhýbá růstu entropie, spočívá v genech. Schrödinger postuloval, že genetický materiál je „aperiodický“ krystal, který nemá striktně se opakující strukturu, a proto může sloužit jako „dědičný kód“: údajně jde o první použití tohoto termínu v biologické literatuře. Sám Schrödinger - tak jako mnoho biologů oné doby - předpokládal, že dotyčný kvazikrystal musí být bílkovina, Crick a Watson ale během bouřlivého desetiletí dospěli k závěru, že krystalovou strukturu má sama DNA. Ve svém druhém článku, publikovaném roku 1953 v časopise *Nature*, napsali: „Zdá se tedy být pravděpodobné, že kódem, který nese genetickou informaci, je konkrétní pořadí bází.“ Tato věta je základem moderní biologie, pro niž je informace tím nejdůležitějším. Genomové sekvence se zkoumají *in silico*, tedy počítačem, a život je definován z hlediska přenosu informace.

Genomy jsou branou do kouzelné země. Kvanta zakódovaných informací, v našem případě o délce tří miliard písmen, se čtou jako experimentální román. Příležitostně soudržný příběh rozdělený do krátkých kapitol přerušují bloky opakujícího se textu, verše, prázdné stránky, výrazy proudu vědomí, má svéráznou interpunkci. Jen velmi malá část našeho genomu (méně než dvě procenta) kóduje bílkoviny. Větší část plní regulační funkce a zbytek mnohdy slouží jako zdroj ostrých pŕetek mezi jinak kultivovanými vědci.\* To teď ale

---

\* Probíhá hlasitá debata o tom, zda všechna tato nekódující DNA slouží nějakému užitečnému účelu. Někteří tvrdí, že ano a že by se měl přestat používat termín „odpadní DNA“. Jiní upozorňují na takzvaný „cibulový test“: pokud většina nekódující DNA plní nějakou užitečnou funkci, proč cibule potřebuje pětkrát víc genů než člověk? Nejspíše by bylo opuštění tohoto termínu předčasné. Odpad a harampádí si také občas skládajeme v garáži s tím, že by se jednou mohlo hodit.

není důležité. Jisté je, že v genomu mohou být zakódovány i desetitisíce genů a velké množství složitých regulačních pokynů, díky nimž je možné specifikovat všechny důležité kroky potřebné k transformaci housenky v motýla nebo dítěte v dospělého člověka. Ze srovnání genomů živočichů, rostlin, hub a jednobuněčných améb vyplývá, že se ve všech případech uplatňují tytéž procesy. V genomech nejrozmanitějších velikostí a typů můžeme najít různé varianty stejných genů, identické regulační elementy, totožné sobecké replikátory (třeba viry) a stejné úseky opakujících se nesmyslů. Cibule, pšenice a améba mají více genů a více DNA než my. Genomy obojživelníků, jako žab nebo mloků, jsou větší o více než dva řády, přičemž někteří mloci mají až 40krát větší genom než my a některé žáby ho zase oproti nám mají sotva třetinový. Kdybychom měli omezení kladená na architekturu genomů shrnout do jediného spojení, znělo by: „Možné je všechno.“

To je důležité. Pokud genomy představují informaci a pokud nejsou co do velikosti a struktury nijak fundamentálně omezeny, neexistují tím pádem ani žádná omezení pro informaci jako takovou. To neznamená, že pro genomy neplatí vůbec žádná omezení. Nějaká zjevně existují. K silám působícím na genom patří přírodní výběr i různé nahodilejší faktory - náhodná duplikace genů, chromozomů či celého genomu, inzerce, delece i invaze parazitické DNA. Jak všechny podobné změny dopadnou, závisí na faktorech, jako je typ ekologické niky, mezidruhovná konkurence a velikost populace. Z našeho úhlu pohledu jsou všechny tyto faktory nepředvídatelné. Jsou součástí prostředí. Pokud je prostředí přesně specifikované, můžeme být schopni předpovědět velikost genomu konkrétních druhů. Existuje však bezmezná množství druhů, které žijí v nekonečně rozmanitých mikroprostředích, od vnitřku našich buněk přes města po oceánské hlubiny. Měli bychom očekávat, že genomy budou stejně variabilní jako faktory, jež na ně v těchto různorodých prostředích působí. Genomy nepředpovídají budoucnost, ale upomínají na minulost - odrážejí její požadavky.

Zamysleme se znovu nad mimozemskými světy. Jestliže je pro život určujícím prvkem informace a pro informaci neplatí žádná omezení, pak nedokážeme předpovědět nic o tom, jak by mohl vypadat život na jiné planetě, s výjimkou toho, že nebude porušovat fyzikální zákony. Jakmile se objeví nějaký druh dědičného materiálu (ať už DNA nebo cokoli jiného), nebudou ze strany informace působit na průběh evoluce žádná omezení, a i přes znalost prvotních principů bude nepředvídatelný. Co se během ní skutečně vyvine, bude záviset na konkrétních podmínkách prostředí, historických náhodách a vynalézavosti selekce. Vraťme se však na Zemi. Tento výrok je opodstatněný, pokud jde o obrovskou rozmanitost života, tak jak v současnosti existuje. Podíváme-li se však na dlouhou historii planety, je prostě mylný. Zdá se, že pro život po několik miliard let platila omezení, která nelze snadno interpretovat z hlediska genomu, historie

nebo prostředí. Až donedávna nebyly dějiny života na Zemi vůbec jasné a i dnes panují spory o různých detailech. Načrtněme si, jaký názor se aktuálně formuje, a porovnejme ho se staršími představami, jež se nyní zdají být chybné.

### **STRUČNÁ HISTORIE PRVNÍCH DVOU MILIARD LET ŽIVOTA**

Naše planeta je stará přibližně 4,5 miliardy (tedy 4 500 milionů) let. V raných fázích své existence zažívala divoké časy, neboť během formování rodící se Sluneční soustavy byla asi 700 milionů let vystavena intenzivnímu meteoritickému bombardování. Tehdy došlo i k mohutné srážce s objektem o velikosti Marsu, po níž pravděpodobně vznikl Měsíc. Na rozdíl od Země, jejíž aktivní geologické procesy převracely zemskou kůru, se na prastarém měsíčním povrchu dochovaly důkazy tohoto bombardování v podobě kráterů, jejichž stáří bylo určeno analýzou hornin sesbíraných při misích Apollo.

Navzdory absenci pozemských hornin srovnatelného stáří existuje několik vodítek, jež nám pomáhají určit, jaké podmínky na mladé Zemi panovaly. Konkrétně složení zirkonů (drobných krystalů křemičitanu zirkoničitého, které jsou menší než zrnko písku a byly nalezeny v mnoha horninách) naznačuje, že oceány byly na planetě mnohem dříve, než jsme si původně mysleli. Díky uranovému datování víme, že některé z těchto mimořádně odolných krystalů vznikly před asi 4 až 4,4 miliardy let a že se poté hromadily jako detritická zrna v sedimentárních horninách. Krystaly zirkonu se chovají jako drobné klíčky, v nichž se zachycují různé chemické nečistoty, a prozrazují tak, v jakém prostředí minerály vznikaly. Chemické složení raných zirkonů napovídá, že se formovaly za relativně nízké teploty a v přítomnosti vody. Obrázek, jaký nám malují, se tedy velmi liší od sopečného pekla s oceány vroucí lávy, jež živě zachycují umělecká ztvárnění období známého jako hadaikum. Zirkony naopak ukazují na svět s větší rozlohou klidných vod a omezenou plochou souší.

Stejně tak při studiu zirkonů neobstojí ani stará představa o prvotní atmosféře překypující plyny jako metan, vodík a amoniak, jež spolu reagují za vzniku organických molekul. Krystaly zirkonu mimoto obsahují různé stopové prvky jako cer, především v oxidované formě. Vysoký obsah ceru v nejstarších zirkonech naznačuje, že atmosféře dominovaly oxidované plyny unikající ze sopek, zejména oxid uhličitý, vodní pára, dusík a oxid siřičitý. Tato směs se zas tolik neliší od dnešního složení vzduchu, s tou výjimkou, že prvotní atmosféře chyběl kyslík, který se rozšířil až mnohem později, po nástupu fotosyntézy. Zjišťovat podobu dávno zmizelého světa z několika rozptýlených zirkonových krystalů znamená přikládat velkou důležitost několika zrnkům písku, ale pořád je to lepší než nemít důkazy žádné. Tyto navíc konzistentně poukazují na planetu pozoruhodně podobnou té, již známe dnes. Občasné dopady asteroidů mohly

způsobit částečné odpaření oceánů, ale není pravděpodobné, že nějak zásadně poznamenaly bakterie žijící v oceánských hlubinách, pakliže už se vyvinuly.

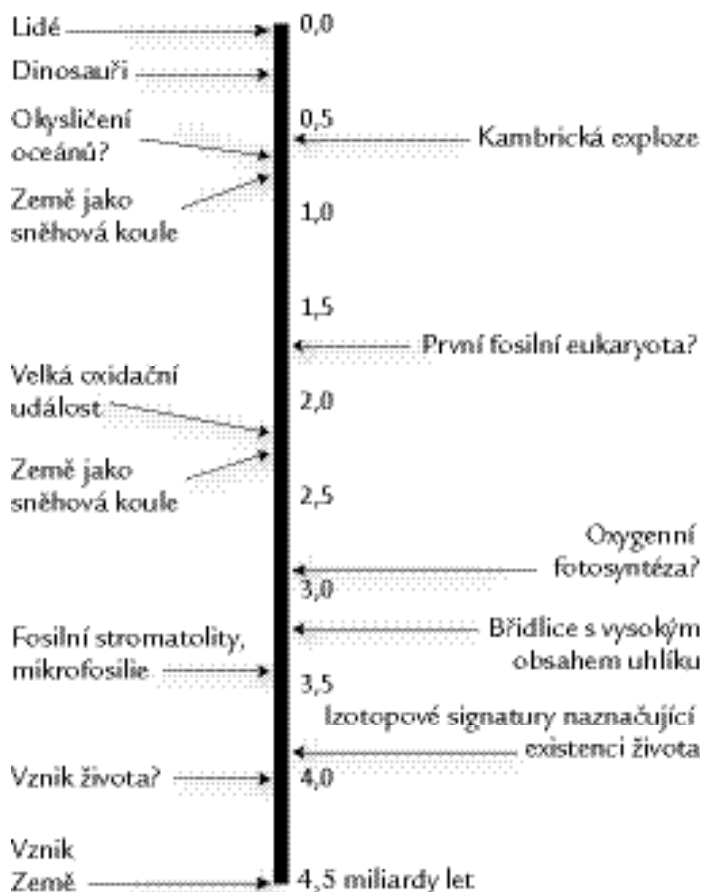
Stejně chatrné jsou i nejstarší důkazy pozemského života, jež byly nalezeny v horninách z lokalit Isua a Akilia v jihozápadním Grónsku. Horniny jsou staré přibližně 3,8 miliardy let, a patří tak vůbec k nejstarším známým horninám na světě (časovou osu si můžete prohlédnout na obrázku 2). Tyto důkazy nemají podobu fosilií nebo složitých molekul vytvořených živými buňkami („biomarkerů“), ale pouze nenáhodně uspořádaných uhlíkových atomů v grafitu. Uhlík se vyskytuje ve dvou stabilních formách neboli izotopech, jež se nepatrně liší atomovou hmotností.\* Enzymy (bílkoviny, které katalyzují reakce v živých buňkách) o něco víc preferují lehčí formu  $^{12}\text{C}$ , která se proto v organické hmotě hromadí. Atomy uhlíku si můžete představit jako pingpongové míčky. Menší míčky poskakují rychleji, takže s větší pravděpodobností narážejí do enzymů, a proto se i s větší pravděpodobností přemění na organický uhlík. Naproti tomu těžší forma  $^{13}\text{C}$ , která představuje jen 1,1 % veškerého uhlíku, zůstane spíše v oceánech a může se po vysrážení uhličitany hromadit v sedimentárních horninách, například ve vápenci. Tyto drobné rozdíly jsou natolik konzistentní, že se na ně často pohlíží jako na určující znak života. Neplatí to navíc jen pro uhlík. Živé buňky podobně frakcionují i izotopy jiných prvků, jako je železo, síra a dusík. A právě tato izotopová frakcionace je patrná v grafitových inkluzích z lokalit Isua a Akilia.

Každá stránka tohoto výzkumu, od stáří samotných hornin po existenci drobných uhlíkových zrněk údajně dokazujících existenci života, byla zpochybněna. A co víc, ukázalo se, že frakcionování izotopů vůbec není unikátním znakem života, ale mohou jej, byť slaběji, napodobit geologické procesy v hydrotermálních průduších. Pokud jsou grónské horniny opravdu tak staré, jak se zdá, a pokud skutečně obsahují frakcionovaný uhlík, stále nejde o důkaz života. Může to působit odrazujícím dojmem, ale nahlíženo z jiného úhlu se nejedná o nic překvapivého. V této knize budeme tvrdit, že rozdíl mezi „živou planetou“ (planetou, která je geologicky aktivní) a živou buňkou je jen otázkou definice. Žádná přesná dělicí čára neexistuje. Geochemie plynule přechází v biochemii. Z této perspektivy je očekávatelný fakt, že v těchto horninách nejsme schopni rozlišit mezi biologickými a geologickými procesy. Máme zde živou planetu, která dává vzniknout životu, a tyto dvě věci nelze oddělit, aniž bychom porušili logiku vývoje.

Posuňme se o několik set milionů let vpřed a důkazy života začnou být hmatatelnější: stejně pevné a pochopitelné jako starodávné horniny z Austrálie

---

\* Existuje ještě třetí nestabilní izotop uhlíku  $^{14}\text{C}$ , který je radioaktivní a má poločas rozpadu 5 570 let. Tímto izotopem se často určuje stáří lidských artefaktů, ale pro studium dávných geologických period nemá význam, takže není důležitý ani pro nás.



**Obr. 2:** Časová osa života.

Časová osa ukazuje přibližnou dataci některých klíčových událostí rané evoluce. Mnohá data jsou nejistá a diskutabilní, nicméně většina důkazů naznačuje, že bakterie a archea vznikly asi 1,5 až 2 miliardy let před eukaryoty.

a jižní Afriky. K dispozici máme mikrofosilie, jež vypadají jako buňky, ale snaha zařadit je do některé moderní skupiny je nevděčný úkol. Mnohé z těchto drobných fosilií jsou lemované uhlíkem, opět s charakteristickou izotopovou signaturou, leč tentokrát poněkud konzistentnější a výraznější, což ukazuje spíše na organizovaný metabolismus než na chaotické hydrotermální děje. Jsou tu také struktury připomínající stromatolity, jakési vypouklé katedrály bakteriálního života, v nichž buňky vytvářejí jednu vrstvu za druhou, načež hlouběji pohřbené vrstvy mineralizují, mění se v kámen a časem vytvoří pozoruhodně vrstvené,

metr vysoké kamenné struktury. Kromě těchto přímých fosilií máme z doby před 3,2 miliardy let k dispozici i rozsáhlé geologické útvary, které se rozkládají na stovkách kilometrů čtverečních a jsou desítky metrů hluboké. Na mysl máme především páskované železné rudy a břidlice s vysokým obsahem uhlíku. O bakteriích a minerálech obvykle uvažujeme jako o obyvatelích dvou odlišných světů, živého oproti neživému. Ve skutečnosti se však na usazování mnoha sedimentárních hornin ve velkém podílejí bakteriální procesy. V případě páskovaných železných rud, jež jsou díky střídajícím se černým a červeným vrstvám opravdu nádherné, bakterie odebíraly železu rozpuštěnému v oceánech elektromy (za nepřítomnosti kyslíku je takového dvojmocného železa víc než dost) a nechávaly za sebou nerozpustné (trojmocné) zbytky, které klesaly do hlubin. Proč jsou tyto na železo bohaté horniny pruhované, zůstává záhadou, ale izotopové signatury opět prozrazují vliv biologických procesů.

Rozsáhlé usazeniny nepoukazují jen na život, ale rovněž na fotosyntézu. Nikoli na ten dobře známý typ fotosyntézy, jenž probíhá všude kolem nás v zelených listech rostlin a řasách, ale na jejího jednoduššího předchůdce. Ve všech formách fotosyntézy se světelná energie využívá k odebrání elektronů neochotnému donoru. Elektrony jsou následně vnuceny oxidu uhličitému a vznikají organické molekuly. Existují různé druhy fotosyntézy, které se liší původem elektronů. Ty mohou pocházet z nejrůznějších myslitelných zdrojů, nejčastěji z rozpuštěného (dvojmocného) železa, sulfanu či vody. Elektrony jsou vždy přeneseny na oxid uhličitý a zůstává po nich odpad: železité usazeniny, elementární síra nebo kyslík. Zdaleka největším oříškem k rozlousknutí je voda. Před 3,2 miliardy let dobýval život elektrony z jakéhokoli jiného zdroje. Jak poznamenal biochemik Albert Szent-Györgyi, život není nic než elektron, který hledá místo k odpočinku. Kdy přesně život udělal poslední krok k získávání elektronů z vody, je sporné. Někteří tvrdí, že už v raných fázích evolučního vývoje, avšak aktuální přesvědčivé důkazy naznačují, že „oxygenní“ fotosyntéza se objevila před 2,9 až 2,4 miliardy let, nedlouho před kataklyzmatickou érou globálního neklidu, krizí středního věku naší planety. Po období celosvětového zalednění („Snowball Earth“ neboli „zamrzlá Země“ či „Země jako sněhová koule“) následovala před 2,2 miliardy let takzvaná velká oxidační událost, tedy rozsáhlá oxidace suchozemských hornin, po níž nám jako definitivní důkaz výskytu kyslíku ve vzduchu zůstaly zrezivělé „pestré vrstvy“ (*red beds*). Růst hladiny atmosférického kyslíku indikuje i samotné zalednění. Oxidací metanu kyslík tento potentní skleníkový plyn odstranil z atmosféry a odstartoval ochlazení celé planety.\*

---

\* Metan produkovaly metanogenní bakterie, přesněji řečeno archea, které prosperovaly před 3,4 miliardy let, můžeme-li věřit izotopovým signaturám (metanogeny produkují mimořádně silný signál). Jak bylo zmíněno výše, metan nebyl významnou složkou prvotní zemské atmosféry.

Po nástupu oxgyenní fotosyntézy byla metabolická souprava nástrojů života v podstatě kompletní. Náš poznávací zájezd napříč skoro dvěma miliardami let pozemské historie – obdobím třikrát až čtyřikrát delším než celé období existence živočichů – pravděpodobně není do detailu přesný, ale vyplatí se zastavit a zamyslet se, co nám tento úplnější obraz prozrazuje o našem světě. Zaprvé, že se život objevil poměrně brzy, pravděpodobně někdy před 3,5 až 4 miliardami let, ne-li dřív, a to ve světě zalitým vodou, nikoli nepodobném tomu dnešnímu. Zadruhé, že před 3,5 až 3,2 miliardy let bakterie už vynalezly většinu forem metabolismu, včetně několika druhů dýchání a fotosyntézy. Miliardu let byl svět bakteriálním kotlem, který vykazoval biochemickou vynalézavost, o jaké si můžeme nechat jen zdát.\* Izotopová frakcionace naznačuje, že všechny hlavní koloběhy živin – uhlíku, dusíku, síry, železa a tak dále – existovaly už před 2,5 miliardy let. Avšak teprve po vzestupu hladiny kyslíku, který začal před 2,4 miliardy let, život planetu přetvořil do té míry, že tento prosperující bakteriální svět bylo možné jako živý detekovat z vesmíru. Teprve poté se začaly v atmosféře hromadit reaktivní směsi plynů jako kyslík a metan, jež jsou živými buňkami setrvale doplňovány, a prozrazují tak vliv biologických procesů v celoplanetárním měřítku.

### PROBLÉM S GENY A PROSTŘEDÍM

Velká oxidační událost se dlouho pokládala za ústřední okamžik v dějinách života naší planety, ale vnímání jejího významu se v posledních letech radikálně změnilo a nová interpretace je pro argumentaci v této knize stěžejní. Stará verze pohlížela na kyslík jako na rozhodující environmentální faktor v evoluci života. Kyslík podle ní neurčuje, co se vyvine, ale umožňuje evoluci daleko větší complexity – uvolňuje brzdy. Například živočichové potravu získávají tak, že se fyzicky pohybují a pronásledují kořist, popřípadě jsou sami kořistí a prchají, aby nebyli chyceni. To evidentně vyžaduje hodně energie, takže je snadné si představit, že by živočichové nemohli existovat bez přítomnosti kyslíku, který jim poskytuje téměř o řád více energie než jiné formy dýchání.\*\* Tento výrok je natolik fádni a nezajímavý, že skoro ani nestojí za zpochybňováním. V tom však spočívá problém: představa nevyzývá k dalšímu promyšlení. Můžeme brát za

---

\* V této kapitole se pro jednoduchost budu většinou odvolávat pouze na bakterie, ačkoli mám na mysli prokaryota, tedy bakterie i archea, o nichž jsme mluvili v úvodu. K významu archeí se vrátíme na konci kapitoly.

\*\* Přísně vzato to není pravda. Nejenže aerobní dýchání vytváří téměř o řád více použitelné energie než fermentace (kvašení), ale fermentace technicky vůbec druh dýchání není. Právě anaerobní dýchání využívá jako akceptor elektronu jiné látky než kyslík, například dusičnany, a ty poskytují skoro stejné množství energie jako samotný kyslík. Tyto oxidanty se však mohou nahromadit v míře vhodné k dýchání pouze v aerobním světě, jelikož jejich tvorba závisí na kyslíku. Takže i kdyby mořská zvířata dokázala při dýchání místo kyslíku využívat dusičnany, mohla by tak činit pouze v oksyločeném světě.

samozřejmě, že zvířata potřebují kyslík (třebaže to není vždy pravda) a mají ho, z čehož plyne, že kyslík je společným jmenovatelem. Skutečné evolučně biologické problémy se tedy týkají vlastností a chování živočichů a rostlin. Nebo to tak alespoň vypadá.

Na tomto pohledu se nepřímou zakládá učebnicová představa o dějinách Země. O kyslíku máme sklon uvažovat jako něčem, co je prospěšné a dobré pro zdraví. Z hlediska prapůvodního metabolismu ovšem zdraví prospěšný v žádném případě není. Naopak je jedovatý a reaktivní. Jak jeho hladina v prostředí rostla, pokračují učebnice, vystavil celý mikrobiální život silnému selekčnímu tlaku. Zaznívají drsné příběhy o hromadných vymíráních nesmírných rozměrů – Lynn Margulisová to označuje za „kyslíkový holocaust“. Fakt, že ve fosilním záznamu není po podobném kataklyzmatu žádná stopa, nás nemusí moc trápit (jak jsme ujišťováni), ti tvorové totiž byli velice malí a odehrálo se to strašně dávno. Kyslík si vynutil nové vztahy mezi buňkami, symbiózu a endosymbiózu, v nichž si buňky mezi sebou a uvnitř sebe vyměňovaly nástroje k přežití. Během stovek milionů let postupně rostla komplexita, jelikož se buňky učily nejen to, jak s kyslíkem nakládat, ale i jak těžit z jeho reaktivity: vyvinulo se u nich aerobní dýchání, jež jim poskytlo mnohem více energie. Tyto velké, komplexní aerobní buňky zabalily svou DNA do specializované schránky (kompartimentu) zvané jádro, což jim vyneslo pojmenování „eukaryota“, doslova „pravojaderní“. Znovu si připomeňme, že takto se odvíjí učebnicový příběh. Zde budeme tvrdit, že je chybný.

Z eukaryotických buněk se skládá veškerý komplexní život, který dnes kolem sebe vidíme – všechny rostliny, zvířata, houby a protista (velcí jednobuněční tvorové jako améby). Podle klasického příběhu eukaryota v průběhu miliardy let postupně získala nadvládu. Toto období se paradoxně nazývá „nudná miliarda“, jelikož se toho podle fosilního záznamu moc nestalo. V usazeninách z doby před 1,6 až 1,2 miliardy let nicméně začínáme nacházet fosilie jednobuněčných organismů, které vypadají jako eukaryota, a některé z nich dokonce snadno zapadnou do moderních skupin, jako jsou ruduchy a houby.

Pak nastalo další období globálního neklidu a před asi 750 až 600 miliony let celou planetu několikrát pokrýval led. Brzy poté hladina kyslíku rychle stoupla na téměř současnou úroveň a ve fosilním záznamu se náhle objevují zkameněliny prvních živočichů. První velké fosilie o průměru až jeden metr patří tajemné skupině symetrických, vějířovitě tvarovaných organismů, jež většina paleontologů interpretuje jako živočichy živící se filtrováním, ačkoli někteří trvají na tom, že to byly pouze lišejníky. Přezdívá se jim ediakarská fauna nebo láskyplněji vendobionti. Stejně rychle jako se objevili, tyto tvorové následně kompletně vyhnuli a na počátku období zvaného kambrium byli před 541 miliony let (letopočet mezi biology tak ikonický jako mezi dějepisci 1066 nebo 1492)

nahrazení explozivním příchodem již rozpoznatelnějších živočichů. Na evoluční scénu vtrhli v moderním darwinovském duchu „zubů a drápů krvavých“ velcí, pohybliví a lítí predátoři se složitými očima a znepokojivými výběžky i jejich hrůzu nahánějící opancěřovaná kořist.

Jak moc je vlastně tento scénář mylný? Na první pohled působí věrohodně. Podle mého názoru je tu však chybný podtext a stejně tak, jak zjišťujeme, i řada detailů. Podtext souvisí se vzájemným působením mezi geny a prostředím. Celý příběh se točí kolem kyslíku, údajně klíčové environmentální proměnné, která umožnila genetickou změnu a uvolnila stavidla inovace. Hladina kyslíku vzrostla dvakrát, poprvé během velké oxidační události před 2,4 miliardy let a poté koncem dlouhého prekambriického období před 600 miliony let (obrázek 2). Stoupající hladina kyslíku podle zavedené verze pokaždé uvolnila strukturální a funkční omezení uvalená na život. Po velké oxidační události, která přinesla nové hrozby i příležitosti, se buňky během série endosymbióz pustily do vzájemného obchodování a zesložitovaly se do podoby pravých eukaryotických buněk. Když hladina kyslíku vzrostla před kambrickou explozí podruhé, fyzická omezení jako mávnutím kouzelného proutku zmizela úplně a poprvé odhalila možnosti živočichů. Nikdo netvrdí, že kyslík tyto změny fyzicky poháněl, spíše že přetvořil selekční krajinu. V této nové krajině bez jakýchkoli omezení a s nádhernými výhledy se genomy mohly svobodně rozpínat a jejich informační obsah konečně nic nedusilo. Život vzkvétal a dle svých možností zaplnil všechny myslitelné ekologické niky.

Tento pohled na evoluci lze chápat ve smyslu dialektického materialismu, který byl v souladu s principy některých předních evolučních biologů během neodarwinistické syntézy, jež probíhala od počátku do poloviny 20. století. Vzájemně se prolínajícími protiklady jsou zde geny a prostředí, problém jinak známý také jako „příroda versus výchova“ (nature vs. nurture). Fungování našich těl závisí na genech a jejich chování závisí na prostředí. Co jiného tu koneckonců je? Nuže, v biologii nejde jen o geny a prostředí, ale také o buňky a omezení kladená na jejich fyzickou strukturu, což, jak uvidíme, přímo s geny ani prostředím nijak zvlášť nesouvisí. Z těchto neslučitelných pohledů na svět plynou nápadně odlišné předpovědi.

Zvažme první možnost, tedy interpretaci evoluce z hlediska genů a prostředí. Hlavním environmentálním omezením na rané Zemi je nedostatek kyslíku. Přidejme kyslík a život bude vzkvétat. Všechny život, který je působení kyslíku vystaven, je jím tak či onak ovlivněn a musí se adaptovat. Některé buňky jsou náhodou aerobním podmínkám přizpůsobeny lépe a množí se, zatímco jiné hynou. Existuje však mnoho rozdílných mikroprostředí. Přibývání kyslíku nevede k prostému zaplavení celého světa, jako by šlo o nějaký úzce zaměřený globální ekosystém. Plyn oxiduje minerály na souši a rozpouští se v oceánech,

což vede i k obohacení anaerobních nik. Dostupnost dusičnanů, dusitanů, síranů, siřičitanů a tak dále roste. Tyto látky lze v buněčném dýchání použít místo kyslíku, takže anaerobní dýchání v aerobním světě prosperuje. To vše zvyšuje v novém světě množství způsobů obživy. Představte si nahodilou směs buněk v prostředí. Některé z nich, jako třeba améby, se živí fyzickým pohlcováním jiných buněk, což je proces známý pod názvem fagocytóza. Jiné provozují fotosyntézu. A další, jako například houby, potravu přijímají celým povrchem těla, tedy osmotroficky. Pokud struktura buňky nepřináší nějaká nepřekonatelná omezení, očekávali bychom, že všechny tyto rozmanité typy buněk pocházejí z různých, navzájem odlišných bakteriálních předků. Jedna ancestrální buňka si o trochu lépe vedla v nějaké primitivní formě fagocytózy, další v jednoduché formě osmotrofie a jiná ve fotosyntéze. Časem se jejich potomci specializovali a adaptovali na konkrétní způsob života.

Vyjádríme-li se formálněji, pokud rostoucí hladina kyslíku umožnila rozkvet nových způsobů života, čekali bychom, že budeme svědky *polyfyletické radiace*, při níž se nepříbuzné buňky či organismy (z různých taxonů) rychle adaptují a dají vzniknout mnoha novým druhům, které zaplní neobsazené niky. Přesně takový příběh pozorujeme. Někdy. Například během kambrické exploze se objevily desítky živočišných kmenů, třeba houbovci, ostnokožci, členovci nebo hlístice. Tyto velké radiace živočichů byly doprovázeny odpovídajícími radiacemi mezi řasami, houbami, protisty či nálevníky. Ekologické vztahy se nesmírně zkomplikovaly, což samo o sobě pohánělo další změny. Ať už kambrickou explozi zažehla rychle rostoucí koncentrace kyslíku, nebo něco jiného, panuje všeobecná shoda, že změna prostředí skutečně zapříčinila posun selekčních tlaků. Něco se stalo a svět se navždy změnil.

Porovnejme tento scénář s tím, ve kterém by strukturální omezení naopak dominovala. Dokud se tato omezení nepodaří překonat, mělo by v reakci na jakékoli environmentální posuny docházet jen k malým změnám. Očekávali bychom dlouhá období stagnace hluchá vůči proměnám okolního prostředí a jen velice vzácné *monofyletické radiace*. Jinak řečeno - pokud konkrétní skupina zcela výjimečně překoná svá vnitřní strukturální omezení, projde radiací jen ona sama a zaplní prázdné niky (ačkoli možná se zpožděním, až to dovolí změna prostředí). Nepochybně se setkáváme i s tímto. Při kambrické explozi došlo k radiaci v různých živočišných skupinách, ne však k vícenásobnému vzniku samotných živočichů. Všichni živočichové mají společného předka, a totéž platí i pro všechny rostliny. Komplexní mnohobuněčný vývin, který vyžaduje oddělenou zárodečnou a somatickou (tělní) linii, je obtížný. Omezení v tomto případě do jisté míry souvisejí s požadavkem na přesný vývojový program, který uplatňuje přísnou kontrolu nad osudem jednotlivých buněk. Na méně striktní úrovni je však určitý stupeň mnohobuněčného vývinu společný a samotná mnohobuněčnost vznikla v různých

skupinách, včetně mořských řas, hub a hlenek, nezávisle alespoň třicetkrát. Zdá se však, že v jednom bodě jsou omezení kladená fyzickou (buněčnou) strukturou natolik dominantní, že překonávají vše ostatní. Na mysl máme vznik eukaryotické buňky (vznik velkých komplexních buněk) z bakterií po velké oxidační události.

### ČERNÁ DÍRA V SRDCI BIOLOGIE

Pokud se složité eukaryotické buňky skutečně vyvinuly v reakci na vzestup hladiny atmosférického kyslíku, předpokládali bychom *polyfyletickou* radiaci, během níž by komplexní buňky vznikly nezávisle v různých, nepříbuzných skupinách bakterií. Také bychom očekávali, že fotosyntetické bakterie dají vzniknout větším a složitějším řasám, osmotrofní bakterie houbám, pohyblivé dravé buňky fygocytům a tak dále. K evoluci větší komplexity by docházelo prostřednictvím klasických genetických mutací, výměny genů a přírodního výběru, nebo pomocí endosymbiotických fúzí a akvizic, jak to v dobře známé teorii sériové endosymbiózy postulovala Lynn Margulisová. Buď jak buď, pokud na buněčnou strukturu nepůsobí žádná fundamentální omezení, měla by rostoucí hladina kyslíku umožnit vznik větší komplexity bez ohledu na přesný průběh evoluce této komplexity. Předpokládali bychom, že kyslík zbaví omezení všechny buňky a umožní polyfyletickou radiaci, při níž u nejrůznějších nepříbuzných bakterií nezávisle vzroste míra komplexity. Jsme však svědky něčeho jiného.

Vyložme si to podrobněji, neboť tato úvaha je klíčová. Pokud budou složité buňky vznikat „standardním“ přírodním výběrem, který pracuje s odchylkami vzniklými genetickými mutacemi, předpokládali bychom, že uvidíme různorodou skupinu vnitřních struktur, jež budou stejně pestré jako vnější vzhled buněk. Eukaryotické buňky jsou úžasně rozmanité co do velikosti a tvaru, od gigantických listovitých buněk řas přes dlouhé tenké neurony po rozplácené améby. Pokud si eukaryota většinu své komplexity vyvinula v průběhu adaptace na rozdílné způsoby života v odlišných populacích, měla by se tato dlouhá historie odrážet i v různorodosti jejich vnitřních struktur. Když se ale do jejich buněk podíváme (brzy to uděláme), zjistíme, že se všechna eukaryota v podstatě skládají z totožných komponent. Většina z nás v elektronovém mikroskopu nedokáže rozlišit mezi rostlinnou buňkou, buňkou ledviny a protistem z nedalekého rybníka. Všechny uvedené buňky jsou si pozoruhodně podobné. Jen to zkuste na obrázku 3. Jestliže rostoucí hladina kyslíku odstranila omezení kladená na komplexitu, na základě „standardního“ přírodního výběru bychom předpověděli, že adaptace na různé způsoby života by měla vést k polyfyletické radiaci v různých populacích. Skutečnost je však jiná.

Lynn Margulisová od konce 60. let tvrdila, že tento pohled je v každém případě chybný, respektive že eukaryotická buňka nevznikla standardním přírodním

výběrem, ale během série endosymbiotických událostí, při nichž mnoho bakterií spolupracovalo tak těsně, že se některé buňky fyzicky ocitaly v buňkách jiných. Kořeny podobných myšlenek sahají až do počátků 20. století, k Richardu Altmannovi, Konstantinu Merežkovskému, Georgi Portierovi, Ivanu Wallinovi a dalším, kteří prohlašovali, že veškerý komplexní život povstal ze symbióz mezi jednoduššími buňkami. Jejich myšlenky nebyly zapomenuty, ale byly výsměšně označovány za „příliš fantaskní, než aby se nyní zmiňovaly ve slušné biologické společnosti“. V 60. letech, kdy probíhala molekulárně biologická revoluce, stála už Margulisová na pevném, leč stále kontroverzním základu a dnes víme, že přinejmenším dvě části eukaryotické buňky opravdu vznikly z endosymbiotických bakterií: mitochondrie (energetické převodníky eukaryotických buněk), jež pocházejí z  $\alpha$ -proteobakterií, a chloroplasty (fotosyntetické stroje rostlin), které vznikly ze sinic. Téměř o všech ostatních specializovaných „organelách“ eukaryotických buněk se někdy tvrdilo, že jsou endosymbionty, včetně samotného jádra, řasinek a bičíků (kmitajících výběžků, jejichž rytmické vlnění uvádí buňku do pohybu) a peroxizomů (továrny na odbourávání jedovatých látek). Teorie sériové endosymbiózy tedy prohlašuje, že se eukaryota poskládala ze skupiny bakterií, které během několika set milionů let po velké oxidační události začaly spolupracovat.

Je to poetická představa, ale teorie sériové endosymbiózy obsahuje totožné implicitní předpovědi jako standardní teorie přírodního výběru. Pokud by byla pravdivá, měli bychom být svědky polyfyletického původu, tedy nacházet u různých organismů různorodé vnitřní struktury, jež by byly stejně pestré jako vnější vzezření buněk. Očekávali bychom, že v případě libovolné série endosymbióz, při nichž bude symbióza závislá na určité metabolické směně v konkrétním prostředí, najdeme v různých prostředích různé druhy interagujících buněk. Hypotéza předpovídá, že pokud by se z těchto buněk později utvořily orgány komplexních eukaryotických buněk, měla by některá eukaryota disponovat jednou sadou komponent a jiná sadou odlišnou. Čekali bychom, že najdeme všechny možné druhy přechodných článků a nepřibuzných variant číhajících v málo prozkoumaných útočištích, například stojatém bahně. Až do svého předčasného skonu následkem mrtvice v roce 2011 Margulisová neochvějně věřila, že eukaryota jsou bohatou a rozmanitou endosymbiotickou tapiserií. Endosymbióza pro ni byla způsobem života, neprozkoumanou „femininní“ cestou evoluce, na níž spolupráce – „networking“, jak tomu říkala – předstihla nepříjemně maskulinní soupeření mezi lovci a kořistí. Margulisová však při svém uctívání „skutečných“ živých buněk ignorovala méně záživné výpočetní disciplíny jako třeba fylogenetiku, která zkoumá sekvence genů i celých genomů a přesně nám prozrazuje, nakolik si jsou různé eukaryotické organismy příbuzné. A fylogenetika vypráví velice odlišný, a ostatně i mnohem přesvědčivější příběh.

Vážení čtenáři, právě jste dočetli ukázkou z knihy Záhada života.  
Pokud se Vám ukázka líbila, na našem webu si můžete zakoupit celou knihu.