

TEMA

nick lane

vývoj života

DESET VELKÝCH VYNÁLEZŮ EVOLUCE



TEMA

Nick Lane

Vývoj života

nick lane

vývoj života

DESET VELKÝCH VYNÁLEZŮ EVOLUCE

Copyright © Nick Lane, 2009
Translation © Vojtěch Dušek, 2011
Cover and layout © Lucie Mrázová, 2011

ISBN 978-80-87162-85-9
ISBN 978-80-7473-009-2 (PDF)

Mé matce a mému otci. Teď, když jsem sám rodič, si vážím všeho, co jste pro mě udělali, ještě víc než kdy předtím.

Úvod

Deset velkých vynálezů evoluce

Na pozadí neproniknutelné temnoty vesmíru se vyjímá okouzující, modrozelená koule planety Země. Jen necelé dva tucty lidí doposud poznaly, jaký je to pocit hledět na naši planetu z Měsíce nebo z ještě větší vzdálenosti, ale křehká nádhera snímků, které pak poslali domů, se obtiskla do duše celé jedné generace. Tomu pohledu se nic nevyrovná. Malicherné lidské šarvátky o území, ropu a nejrůznější přesvědčení se zdají být nicotné oproti tomu, že ona krásná planeta, obklopená nekonečnou prázdnotou, je naším společným domovem – domovem, o nějž se musíme starat, domovem, o který se dělíme a kterému vdčíme za ty nejúchvatnější vynálezy z dílny samotného života.

Život naší planetu přetvořil z potlučeného, rozžhaveného kusu skály, který kdysi obíhal jednu mladou hvězdu, na živoucí maják, jakým se naše planeta při pohledu z kosmu zdá být. Byl to život, co Zemi zabarvilo modře a zeleně, když nepatrné fotosyntetické bakterie vyčistily vzduch i oceány a naplnily je kyslíkem. Ten se coby nový, znamenitý zdroj energie stal hnací silou života, jenž se díky němu začal šířit. Květiny rozkvétaly lákavými barvami, ve spletutých korálech se ukrývaly hbité zlaté rybky, v černých hlubinách číhala gigantická monstra, stromy se vypínaly k nebesům, zvířata bzučela, kráčela a hleděla na svět kolem sebe. A uprostřed toho všeho jsme se ocitli my, žasnoucí nad nesčetnými záhadami stvoření, kosmická seskupení molekul, která cítí, myslí a podivují se a lámou si hlavu nad otázkou, odkud se tu vlastně vzala.

A poprvé v celé historii naší planety jsme na to přišli. Naše odpověď nemusí být zaručeně správná. Nejde o žádnou nezpochybnitelnou pravdu, ale o sladké plody největší z lidských snah – poznat živý svět kolem nás i v nás samotných a porozumět mu. Určitého hrubého porozumění jsme samozřejmě dosáhli už s Darwinem, jehož dílo *O vzniku druhů* vyšlo před 150 lety. Od Darwinových dob se naše poznatky o minulosti rozšiřovaly nejen díky zkamenělinám, jimiž mezery v našich znalostech vyplňujeme, ale také díky porozumění niterné struktuře genu – porozumění, které se dnes rozšiřuje na každou jednotlivou nitku v honosné tapisérii života. A přitom vše proběhlo jen v posledních několika desetiletích, v nichž jsme se od teorie a abstraktního povědomí dostali k jasné, podrobně vyvedené mapě života sepsané jazyky, které jsme teprve nedávno začali překládat a v nichž se skrývá klíč k odhalení tajemství nejen dnešního živého světa kolem nás, ale také té nejvzdálenější minulosti.

Příběh, který si budeme vyprávět, je dramatičtější, spleťtější a podmanivější než kterýkoli mýtus o stvoření světa. Ovšem stejně jako je tomu u všech takových mýtů, jde o příběh plný proměn, náhlých a fascinujících změn a erupcí dosud nevidaného, které měnily naši planetu k nepoznání a předchozí revoluční změny zanášely novými vrstvami složitosti. Mírumilovná krása naší planety tak, jak ji vidíme z vesmíru, neodpovídá její skutečné historii plné důvtipu, sváru a změn. Je ironií, že bouřlivá minulost planety se odráží i v našich vlastních žabomyších válkách a že my sami, plnitelé Země, se nad ni dovedeme povznést a spatřit ji v její překrásné jednotě.

Velká část oné celoplanetární proměny probíhala s pomocí hrstky evolučních vynálezů, jež doslova změnily svět a ve výsledku umožnily i existenci nás samých. Musím upřesnit, co že myslím slovem „vynálezy“, protože tím nechci říct, že by byly něčím záměrným výtvořem. *Oxfordský slovník angličtiny* uvádí tuto definici vynálezu: „Původní zařízení, přístroj či vytvoření nové, doposud neznámé metody nebo způsobu provozování nějaké činnosti; původ, novinka.“ Evoluce ne-

vidí do budoucnosti a ani neplánuje. Nefiguruje v ní žádný vynálezce ani inteligentní stvořitel. Přirozený výběr podrobuje všechny vlastnosti těm nejnáročnějším zkouškám a vítězství připadne těm nejlepším. Je to gigantická přírodní laboratoř, v jejímž stínu se lidské snahy zdají být nicotné a která v každé jednotlivé generaci důkladně testuje miliardy drobných odlišností. Obklopuje nás systém, jenž je výsledkem slepě probíhajících, avšak důmyslných procesů. Evolucionisté často neformálně hovoří o vynálezech – a výstižněji produkty ohromující tvořivosti přírody skutečně pojmenovat nelze. Zjistit, jak to vše vzniklo, je společným cílem vědců všech vyznání a také každého, koho zajímá, jak jsme vlastně vznikli i my sami.

Tato kniha pojednává o těch největších vynálezech evoluce, o tom, jak každý z nich změnil živý svět, a jak jsme my, lidé, rozluštili tajemství minulosti skoro stejně důvtipně, jako je příroda připravila. Oslavuje nesmírnou vynalézavost života i nás samých. Příběh o tom, odkud jsme se vzali, je dlouhý – vypráví o dlouhé cestě od vzniku života až k našim vlastním životům i smrti. Je to kniha s ambiciózním záběrem. Životem se budeme zabývat v celé jeho délce i šíři, od jeho vzniku v hlubokomořských průduších až k lidskému vědomí, od nepatrných bakterií až k obrovitým dinosaurům. Poslouží nám k tomu celá řada vědních disciplín od geologie a chemie po neurozobrazování, od kvantové fyziky po planetární vědy. A projdeme si přitom celou řadu lidských výzkumných úspěchů od těch nejslavnějších vědců v dějinách až k badatelům zatím skoro neznámým, které sláva možná teprve čeká.

Můj seznam vynálezů byl samozřejmě sestaven ryze subjektivně a mohl by vypadat i jinak; výběr však proběhl podle čtyř kritérií, jež ho dle mého názoru výrazně zúžily na několik nejvlivnějších událostí v historii života.

Prvním kritériem byl požadavek, aby zvolený vynález znamenal pro živý svět – a potažmo i pro celou planetu – převratnou změnu. Už jsem zmínil fotosyntézu, která proměnila Zemi na planetu bohatou na kyslík, jak ji známe dnes (bez čehož by nebyla možná

existence zvířat). Další změny jsou méně očividné, ale téměř stejně všudypřítomné. Dva vynálezy s nejrozsáhlejšími důsledky jsou pohyb, který zvířatům umožnil přesouvat se při pátrání po potravě, a zrak, jenž změnil povahu i chování všech živých organismů. Je docela dobře možné, že rychlý vývoj očí před asi 540 miliony let nemalou měrou přispěl k náhlému objevování náležitě vyvinutých zvířat ve fosilním záznamu, známému pod názvem „kambrijská exploze“. Dalekosáhlými důsledky každého vynálezu se zabývám vždy v úvodu příslušné kapitoly.

Mé druhé kritérium znělo, že vynález musel mít mimořádný význam i pro dnešek. Nejlépe je to vidět na příkladech sexu a smrti. Sex už byl označen za největší existenční absurditu; abychom to pochopili, musíme odhlédnout od celé Kámasútře podobné škály citových poloh od vzteku po extázi a soustředit se jen na samotnou mechaniku sexu mezi buňkami. Proč se tolik živočichů a dokonce i rostlin pouští do sexu, když by se místo toho mohli jen v tichosti kopírovat klonováním, je hlavolam, k jehož rozluštění už jsme velmi blízko. Ovšem je-li sex tou největší existenční absurditou, potom smrt musí být tou největší absurditou neexistence. Proč stárneme a umíráme a přitom trpíme těmi nejstrašnějšími, nejtrýznivějšími chorobami? Za tuto navýsost aktuální záhadu nemůže termodynamika, stanovující zákony chaosu a zkázy, neboť ne vše živé stárne – a i to, co ano, s tím může přestat. Ukážeme si, že evoluce opakovaně prodloužila životy zvířat o celý řád. Lék na stárnutí by nemusel být jen nedosažitelný výmysl.

Třetím kritériem bylo, aby všechny zvolené vynálezy byly přímým produktem evoluce využívající přirozeného výběru namísto, řekněme, evoluce kulturní. Jsem biochemik a o jazyce či společnosti bych nic původního říct nedokázal. Přesto je ale základem všeho, čeho jsme kdy dosáhli, základem všeho lidského, naše vědomí. Jen těžko si lze představit nějakou formu sdíleného jazyka či společnosti, které by nestály na společných hodnotách, způsobech nahlížení nebo citech, němých citech jako jsou láska, štěstí, smutek, strach, touha,

naděje a víra. Jestli se lidská mysl vyvinula, pak musíme zjistit, jak nervy, vysílající signály do mozku, mohou dát vzniknout něčemu na způsob neuchopitelné duše, subjektivnímu vnímání a pocitům. Pro mě jde o biologický problém, i když velmi citlivý, jak se ostatně pokouším vysvětlit v deváté kapitole. Mezi ty největší vynálezy se tedy zařadilo vědomí; jazyk a společnost nikoli, neboť ty jsou jen produkty kulturní evoluce.

Mé poslední kritérium znělo, že zvolený vynález musí být v jistém smyslu symbolický. Domnělá dokonalost oka je takřka typickým problémem, lákajícím badatele ještě v dobách před Darwinem. Od té doby se toho o oku napsalo mnoho, ale masové rozšíření poznatků z oboru genetiky v posledních deseti letech umožňuje přesnější náhled na jeho překvapivý původ. Spirálovitá dvojšroubovice DNA je největším symbolem informačního věku, v němž žijeme. Vznik složitých („eukaryotických“) buněk je dalším takovým symbolem, i když známějším mezi vědci než mezi laickou veřejností. Tento milník byl v posledních čtyřiceti letech jedním z nejkontroverznějších témat mezi evolucionisty a je nesmírně důležitý pro nalezení odpovědi na otázku, jak rozšířený by složitý život mohl být ve vesmíru. Každá kapitola se svým způsobem zabývá stejně symbolickým tématem, jako jsou tato. Ještě na začátku jsem se o svém seznamu poradil s jedním svým přítelem, který mi jako typický vynález pro zvířata doporučil namísto pohybu „vnitřnosti“. Ty by jen sotva mohly být symbolem: alespoň pro mne má symbolickou hodnotu síla svalů – stačí si ji spojit s něčím tak úžasným, jako je létání – oproti tomu vnitřnosti by bez vynálezu pohybu byly sotva víc než sumky, kymácivé sloupky střev, připoutané ke skále. Zdaleka nic symbolického.

Kromě splnění těchto formálnějších kritérií ještě každý vynález musel nějak podněcovat mou vlastní představivost. Zvolil jsem vynálezy, kterým jakožto lidská bytost, obdařená vášnivou zvědavostí, sám chci nejlépe porozumět. O některých jsem už předtím psal a chtěl jsem se k nim vrátit v širším kontextu; ostatní, například DNA, jsou pro každou zvědavou mysl zkrátka neodolatelně přitažlivé. Rozplé-

tání klubka záhad ukrytého hluboko v jejím nitru je jednou z nejznamenitějších vědeckých detektivek posledního půlstoletí. Mohu jen doufat, že se mi podaří vám své vlastní nadšení alespoň částečně zprostředkovat. Dalším takovým případem je teplokrevnost – předmět vášnivých sporů, neboť stále ještě ani zdaleka nepanuje shoda v odpovědi na otázku, zda dinosauři byli aktivní teplokrevní zabijáci či pomalí obří plazi, případně zda se teplokrevní ptáci vyvinuli přímo z blízkého příbuzenstva *tyrannosaura rexe*, nebo zda nemají s dinosauři vůbec nic společného. Jaká skvělá příležitost k tomu, abych si sám prošel existující důkazy!

Tak tedy vznikl můj seznam. Začneme vznikem života a skončíme svojí vlastní smrtí a vyhlídkami na nesmrtelnost, přičemž naše cesta povede přes vrcholy, jako jsou DNA, fotosyntéza, složité buňky, sex, pohyb, zrak, teplokrevnost a vědomí.

Ale ještě než se do toho dáme, musím říct pár slov k leitmotivu tohoto úvodu: k novým „jazykům“, umožňujícím nám nahlédnout do hlubin dávné evoluční historie. Až donedávna vedly do minulosti dvě široké stezky: fosilie a geny. Obě mají úžasnou schopnost vdechnout minulosti život, ale obě mají i své nedostatky. Údajné „mezery“ ve fosilním záznamu se nadhodnocují a mnoho jich bylo za 150 let od doby, kdy dělaly starosti Darwinovi, pracně zaplněno. Problém je, že fosilie – následkem působení těch samých podmínek, jimž vděčí za své zachování – mohou poskytnout jen pokřivený obraz minulosti. Skutečnost, že se z nich dozvídáme tak mnoho, je pozoruhodná. Obdobně je to s porovnáváním detailů v genetických sekvencích, které nám umožňuje konstruovat genealogické stromy ukazující, jak přesně jsme spřízněni s ostatními organismy. Geny se od sebe bohužel nevyhnutelně více a více odlišují, a to až do okamžiku, kdy už nemají společného zhola nic: za určitou hranicí se minulost, popisovaná prostřednictvím genů, zkrsluje. Existují však i účinné metody, které pronikají ještě hloub než geny a fosilie, hluboko do nejvzdálenější minulosti, a tato kniha je částečně i oslavou jejich důmyslnosti.

Dovolte mi uvést jeden z mých oblíbených příkladů, k jehož využití v plnohodnotné knize jsem dosud neměl příležitost. Týká se enzymu (což je bílkovina, katalyzující chemickou reakci) tak nepostradatelného pro život, že se nachází ve všech žijících organismech od bakterie až po člověka. Tento enzym byl porovnán u dvou různých druhů bakterií, jednoho žijícího v nesmírně horkých hydrotermálních průduších, druhého ze zamrzlé Antarktidy. Genetické sekvence kódující enzymy se liší; postupně se od sebe vzdálily natolik, že jsou dnes docela odlišné. Víme, že původně obě skupiny vzešly ze společného předka, protože mezi bakteriemi žijícími v mírnějších podmínkách nalézáme celou řadu spojovacích článků. Ze samotných genových sekvencí toho ale o mnoho více říct nedokážeme. Staly se odlišnými, a to jistě proto, že jejich životní podmínky jsou tolik jiné, ale to je jen abstraktní, ryze teoretický poznatek, suchý a dvourozměrný.

Podívejme se však na molekulární strukturu těchto dvou enzymů, kterou prorazily silné rentgenové paprsky a díky úžasnému pokroku v krystalografii bylo možné ji dešifrovat. Obě struktury se překrývají, jsou jedna druhé tak podobné, že každý ohyb a každá skulina, každé místo a každý výčnělek jsou v obou úplně stejné, a to ve všech třech dimenzích. Necvičené oko by mezi nimi nenalezlo rozdíl. Jinými slovy, i přes velké množství stavebního materiálu, jenž byl v průběhu času obměněn, celkový tvar a struktura molekuly – a tedy i její funkce – nehledě na evoluci přetrvala, stejně jako by katedrála postavená z kamene a pak zevnitř přestavěná s využitím cihel neztratila nic ze své architektonické velkoleposti. A pak přišel další objev. Který stavební materiál se obměňuje a proč? U bakterií z horkých průduchů je enzym vystavěn tak pevně, jak jen je to možné. Stavební kameny k sobě těsně přiléhají, spojeny vnitřními vazbami jako cementem, a tak si dovedou svou strukturu uchovat i navzdory množství energie vycházejícímu z vroucích průduchů. Je to katedrála postavená tak, aby přečkala neustálá zemětřesení. V ledu je tomu přesně naopak. Stavební materiál je tu pružný, aby i v mrazu umožňoval pohyb. Jako by katedrálu místo z cihel postavili z kuličkových ložisek. Když jejich

aktivitu porovnáte při teplotě 6 °C, ledový enzym bude devěťadvacetkrát rychlejší než ten z průduchů; zkuste to ale při 100 °C a rozpadne se na kusy.

Obraz, který před námi vyvstává, je trojrozměrný a plný barev. Změny v genové sekvenci najednou mají smysl: chrání strukturu enzymu a jeho funkci i přesto, že se tak děje v navzájem úplně odlišných prostředích. Teď už najednou víme, k čemu v průběhu evoluce došlo a proč. Už nejde jen o pouhé náznaky, ale o skutečné porozumění.

Podobně jasný náhled na to, co se ve skutečnosti stalo, poskytují i jiné důmyslné nástroje, které dnes máme k dispozici. Například komparativní genomika vzájemně neporovnává jen geny, ale rovnou celé genomy, tisíce genů naráz, a to u stovek různých druhů. To je samozřejmě uskutečnitelné teprve několik málo let, během nichž se výrazně zvýšilo množství celých známých genomových sekvencí. Proteomika nám pak umožňuje pojmout najednou veškeré bílkoviny fungující v buňce a zjistit, jakým způsobem jsou řízeny malým množstvím regulujících genů, uchovaných navzdory celým věkům evoluce. Výpočetní biologie nám dovoluje identifikovat specifické útvary, struktury a motivy, které v bílkovinách zůstávají navzdory změnám v oblasti genů. Izotopická analýza hornin či zkamenělin umožňuje rekonstruovat atmosférické a klimatické změny, k nimž v minulosti došlo. Díky zobrazovacím technikám můžeme sledovat činnost neuronů v myslícím mozku nebo trojrozměrně rekonstruovat strukturu mikroskopických zkamenělin uvězněných v kameni, aniž bychom se k nim museli dobývat. A tak dále.

Žádný ze jmenovaných postupů není nikterak nový. Nová je jejich sofistikovanost, rychlost a dostupnost. Stejně jako tomu bylo s Projektem lidského genomu, jenž s předstihem oproti plánu nabíral čím dál vyšší rychlost, nová data se hromadí v závratném tempu. Velká část těchto nových informací není psána klasickým jazykem populační genetiky a paleontologie, ale jazykem molekul, na jejichž úrovni většinou změny v přírodě probíhají. Spolu s novými metodami se objevuje i nová generace evolucionistů, schopná sledovat průběh

evoluce v reálném čase. Obraz, který tak malují, svou podrobností a rozsahem od subatomární k planetární úrovni bere dech. A proto jsem řekl, že poprvé v historii naší planety jsme na to přišli. Velká část z našeho stále rostoucího souboru vědomostí je jistě jen dočasná, ale také živá a smysluplná. Je radost žít v této době, kdy toho tolik víme a přitom ještě zbývá tolik tajemství, na jejichž rozluštění se můžeme těšit.

Kapitola 1: Vznik života

Na převracející se Zemi

Noc se rychle střídala se dnem. Pozemský den tehdy trval jen asi pět nebo šest hodin. Planeta se zběsile točila kolem své osy. Na nebi visel ohromný, hrozivý Měsíc, který byl tehdy mnohem blíž a zdál se být daleko větší než dnes. Jen zřídkakdy šlo spatřit světlo hvězd, protože atmosféra byla plná prachu a smogu, ale noční oblohu často protínaly působivé meteory. Slunce, když přes matně rudý příkrov smogu vůbec prosvítlo, vypadalo slabě a mdle, neboť ještě nebylo na vrcholu svých sil. Lidé by zde nepřežili. Oči by se nám sice nevypouklily a nepraskly by, jako by se to možná stalo na Marsu, ale našim plicím by se nedostalo ani doušku kyslíku. Chvilí bychom zoufale lapali po dechu a pak bychom se udusili.

Země by tehdy nebyla nejvýstižnější pojmenování. „Moře“ by bývalo bylo lepší. Dokonce i dnes pokrývají oceány dvě třetiny povrchu naší planety a jsou to právě ony, co je z vesmíru vidět především. Tehdy ale zemský povrch zakrývala takřka výhradně voda a z rozbouřených vln se nořilo jen několik malých sopečných ostrovů. Vlny byly vlivem blízkého měsíce obrovské, snad i stovky metrů vysoké. Komety a asteroidy sice už nedopadaly tak často jako dříve, kdy dopady těch největších z nich vyrvaly ze země materiál, z něhož se zformoval Měsíc, ale dokonce i v tomto období relativního klidu oceány běžně pěnily a vřely. Vroucí žár přicházel i zdola. Zemská kůra byla popraskaná, trhlinami se na povrch valily a kroutily stužky magmatu a ohnivé podsvětí o sobě dávalo neustále vědět prostřednictvím sopek. Byl to svět mimo rovnováhu, svět neutuchající činnosti, horečnatě aktivní mladá planeta.

Byl to svět, na kterém před 3,8 miliardami let vznikl život, snad probuzený neklidem samotné planety. Víme to, protože několik zrněk kamene z těch dávno minulých časů přečkalo dlouhé věky plné proměn a přežilo do dnešních dní. V jejich nitru vězí miniaturní částčky uhlíku, do jejichž jaderné struktury se téměř nezaměnitelně obtiskl život. Možná se to zdá jako příliš chatrný podklad pro tak velkolepé tvrzení a možná že je skutečně chybné; mezi odborníky neexistuje v tomto ohledu dokonalá shoda. Ale sloupněte z cibule času ještě pár dalších vrstev a ocitnete se v době před zhruba 3,4 miliardami let, kdy už byly známky života jednoznačně patrné. Země se tehdy hemžila bakteriemi, které po sobě nezanechaly jen uhlíkové stopy, ale také mnoho různých forem mikrofosilií a ony klenuté katedrály bakteriálního života, metr vysoké stromatolity. Bakterie vládly naší planetě po další 2,5 miliardy let, dokud se mezi fosiliemi neobjevily první skutečně složité organismy. A podle někoho jí stále ještě vládnou, neboť ani všechna zvířata a rostliny dohromady se nevyrovňají objemu bakteriální biomasy.

Co na mladé Zemi tedy poprvé vdechlo anorganickým prvkům život? Jsme jedineční, výjimečně vzácní, nebo byla naše planeta jen jednou z trilionu líhni rozptýlených po celém vesmíru? Podle antropického principu na tom jen sotva záleží. Je-li pravděpodobnost existence života ve vesmíru jedna ku trilionu, pak je pravděpodobnost, že se život objeví na některé z trilionu planet, rovna přesně jedné. A protože je naše planeta živá, je očividné, že to musí být právě ona. Ať je život jakkoli výjimečně vzácný, v nekonečném vesmíru vždycky existuje pravděpodobnost, že na jedné planetě vznikne – a na té planetě žijeme.

Jestli vám podobné, až přehnané důmyslné statistiky stejně jako mně připadají neuspokojivé, pak je tu pro vás další neuspokojivá odpověď, předložená nikým menším, než byl Fred Hoyle a později i Francis Crick. Život vznikl někde jinde a naši planetu „nakazil“, buď pouhou náhodou, nebo z úmyslu jakési bohu podobné mimozemské inteligence. Možná se to tak skutečně stalo – kdo by dal ruku do ohně

za to, že ne? – ale většina vědců se od podobných úvah bude držet dál, což je jen rozumné. Tvrdit něco takového je jako usuzovat, že věda tuto otázku nedovede zodpovědět, aniž bychom se obtěžovali zjistit, jestli je tomu skutečně tak, nebo ne. Obvyklým zdůvodněním snahy najít spásu někde jinde ve vesmíru je čas: na Zemi neuplynulo dost času na to, aby se život stihl rozvinout v celé své nesmírné komplexnosti.

Ale kdo ví? Laureát Nobelovy ceny Christian de Duve, stejně vřelý jako výše jmenovaní, ještě dramatičtěji namítá, že podle chemického determinismu musel život vzniknout rychle. K chemické reakci, jak tvrdí, muselo dojít buď rychle, nebo vůbec; pokud by jakákoli reakce měla probíhat tisíc let, pak by se pravděpodobně všechny reaktanty před jejím dokončením jednoduše rozptýlily nebo rozložily, ledaže by platilo, že jsou nepřetržitě nahrazovány jinými, rychlejšími reakcemi. Vznik života byl bezpochyby věcí chemie, takže stejná logika platí i pro něj: základní chemické reakce života musely proběhnout rychle a spontánně. Takže podle de Duveho je mnohem pravděpodobnější, že se život vyvine za 10 000 let než za miliardu.

Nikdy se nedozvíme, jak život na Zemi doopravdy vznikl. Dokonce i kdyby se nám z vířících chemikálií ve zkumavkách podařilo vypěstovat bakterie nebo brouky, kteří by se z nich vyplazili, nikdy se nedozvíme, jak doopravdy vypadal počátek života na naší planetě. Dozvěděli bychom se jen to, že je něco takového možné a snad i pravděpodobnější, než jsme si předtím mysleli. Ale věda není o výjimkách, nýbrž o zákonitostech – a zákony, jimiž se řídil vznik života na naší vlastní planetě, by měly odpovídat těm, jež platí v celém vesmíru. Pátrání po původu života není snahou rekonstruovat něco, k čemu došlo v 6.30 ve čtvrtek ráno v roce 3851 milionů let před Kristem, ale snahou objevit obecné zákonitosti, jimiž se musí řídit vznik jakékoli formy života kdekoli ve vesmíru a především na naší planetě, která je toho jediným nám známým příkladem. Příběh, který si teď budeme vyprávět, téměř jistě není ve všech ohledech bezchybný, ale myslím, že je přinejmenším věrohodný. Chci jím ukázat, že původ života není tak nerozlušti-

telnou záhadou, za jakou je někdy vydáván, ale že život snad až téměř nevyhnutelně vznikl díky převracení povrchu naší planety.

Ve vědě samozřejmě nejde jen o zákony, ale i o experimenty, jejichž prostřednictvím se tyto zákony objasňují. Náš příběh začíná v roce 1953, což byl učiněný annus mirabilis, během něhož došlo ke korunovaci královny Alžběty II., pokoření Everestu, Stalinově smrti, objevu DNA a konečně i k Miller-Ureyovu experimentu, symbolickému počátku vědeckého bádání o původu života. Stanley Miller tehdy působil jako svěhlavý doktorand v laboratoři laureáta Nobelovy ceny Harolda Ureye; zemřel, snad trochu zahořklý, v roce 2007, kdy stále ještě bojoval za myšlenky, jež chabře hájil celého půl století. Ale ať už je osud Millerových specifických stanovisek jakýkoli, jeho skutečným odkazem je obor, kterému položily základ jeho pozoruhodné experimenty, jejichž výsledky nás dokonce i dnes dovedou ohromit.

Miller naplnil vysokou skleněnou baňku vodou a směsicí plynů s cílem simulovat to, co považoval za prvotní složení zemské atmosféry. O plynech, které si k tomu zvolil, se (podle spektroskopie) usuzovalo, že tvoří atmosféru Jupitera, a tudíž se soudilo, že se pravděpodobně hojně vyskytovaly i na mladé Zemi; byly to vodík, metan a čpavek. Miller nechal touto směsí projít několik elektrických výbojů, aby tak napodobil blesky, a čekal. Vždy po několika dnech, několika týdnech a několika měsících odebíral vzorky a analyzoval je s cílem zjistit, co přesně to v baňce vaří. A výsledná zjištění překonala dokonce i jeho nejdivočejší představy.

Vařil prvotní polévku, takřka bájnou směsicí organických molekul, mezi nimiž bylo i několik aminokyselin, stavebních kamenů bílkovin a těch pro život patrně nejsymboličtějších molekul, tedy alespoň v době před tím, než se proslavil objev DNA. A co bylo ještě překvapivější, aminokyseliny vzniklé v Millerově polévce se na rozdíl od jiných, náhodně vzniklých z velkého rezervoáru potenciálních uspořádání, zdály být ty samé, jako se vyskytovaly v živých organismech. Jinými slovy, Miller prohnal jednoduchou směsicí plynů elektřinu a ze směsi se vynořily základní stavební kameny života. Jako by jen

čekaly na vyzvání. Najednou se otázka vzniku života zdála být prostá. Ta myšlenka musela vystihnout něco z ducha oné doby, protože se její příběh dostal až na obálku časopisu *Time* – taková publicita byla u vědeckého experimentu zcela nevídaná.

Časem ale idea prvotní polévky ztratila na popularitě. Na nehlubší dno její oblība padla, když rozborů prastarých hornin jasně dokázaly, že Země nikdy nebyla bohatá na metan, vodík ani čpavek, nebo jimi přinejmenším neoplývala po mohutném ostřelování asteroidy, díky němuž vznikl Měsíc. To grandiózní bombardování rozervalo původní atmosféru naší planety a smetlo ji do vesmíru. Realističtější simulace prvotní atmosféry byly zklamáním. Zkuste prohnat elektrické výboje směsí dusíku a oxidu uhličitého se stopovým množstvím metanu a dalších plynů a vaše úroda organických molekul se neutěšeně zmenší. Po aminokyselinách nebude nikde skoro ani stopa. Prvotní polévka se stala sotva něčím víc než jen pouhou kuriozitou, přestože stále ještě jde o vynikající demonstraci skutečnosti, že jednoduchým postupem lze v laboratoři stvořit organické molekuly.

Ideu polévky zachránilo zjištění, že se v kosmu nachází hojnost organických molekul, především na kometách a meteoritech. Některé se zdály být složeny takřka výhradně ze špinavého ledu a organických molekul a byla na nich nalezena sbírka aminokyselin pozoruhodně podobných těm, které vznikly elektrizací plynů. Nejenže už samotná jejich existence byla překvapivá, ale navíc to začínalo vypadat, že molekuly života – jež tvoří jen malou část obrovského souboru všech možných podob organických molekul – jsou neobyčejně rozšířené. Ono silné ostřelování asteroidy najednou získalo úplně novou tvář: už se nezdálo být jen ničivé, ale stalo se i tím nejvýznamnějším zdrojem vody a organických molekul potřebných pro vznik života. Prvotní polévka neměla svůj původ na Zemi, ale ve vesmíru. A přestože by dopad většinu organických molekul zlikvidoval, výpočty naznačují, že jich pro prvotní polévku mohl přežít dostatek.

Tato myšlenka sice tak docela nepopisuje zavlčení života z vesmíru v podobě, jakou prosazuje kosmolog Fred Hoyle, ale i přesto spojuje původ života – nebo přinejmenším prvotní polévky – s vesmírem.

Život podle ní už není ojedinělou výjimkou, ale nezpochybnitelnou kosmologickou konstantou, stejně nevyhnutelnou jako gravitace. Netřeba říkat, že astrobiologové si ji zamilovali. Mnohým z nich to vydrželo dodnes. Kromě toho, že je ta idea přitažlivá, jim také zajišťuje, že nepřijdou o práci.

Prvotní polévku a především myšlenku, že u života jde o replikátory, zejména geny složené z DNA či z RNA, které se dovedou věrně kopírovat a přecházet na další generaci (o čemž se dozvíme víc v další kapitole), si oblíbili i molekulární genetici. Je bezpochyby pravda, že přirozený výběr bez nějakého druhu replikátorů nemůže fungovat; a stejně tak je pravda, že život se může vyvíjet do složitějších podob jedině prostřednictvím přirozeného výběru. Pro mnoho molekulárních biologů je pak vznik života to samé jako počátek replikace. A teorie polévky do toho hezky zapadá, protože poskytuje všechny komponenty vyžadované soupeřícími replikátory k tomu, aby mohly růst a vyvíjet se. V pěkně husté polévce si replikátory berou, co potřebují, tvoří delší a komplexnější polymery a postupně i využívají dalších molekul k vytváření složitějších struktur, jako jsou buňky a bílkoviny. Z tohoto hlediska je prvotní polévka jako abecední moře hemžící se písmeny, které jen čekají na to, až je přirozený výběr vyloví z vody a složí z nich prvotřídní prózu.

Z těchto důvodů je myšlenka prvotní polévky zrádná. Ne snad proto, že by byla nezbytně chybná – někdy kdysi dávno skutečně mohla existovat, i když by byla mnohem řidší, než jak se původně tvrdilo. Je zrádná, neboť na celá desetiletí odvrátila pozornost od skutečné podstaty vzniku života. Vezměte si velkou plechovku plnou sterilizované polévky (nebo arašidového másla) a nechte ji na několik milionů let odstát. Vznikne tak život? Ne. Proč ne? Protože pokud se obsah plechovky nechá jen tak být, neudělá nic jiného, než že se rozloží. Pokud budete do plechovky opakovaně pouštět elektrický proud, nijak si nepolepšíte, polévka se jenom rozloží ještě rychleji. Nějaký ojedinělý a mohutný výboj, jako například blesk, by mohl pár přilnavějších molekul přimět, aby se shlukly dohromady, ale je mnohem pravdě-

podobnější, že by je zase roztrhnul od sebe. Mohla by takto v polévce vzniknout populace složitějších replikátorů? Pochybuji. Jak se zpívá v písni Arkansaský cestovatel: „Odsud se tam nedostanete.“ Zkrátka to není termodynamicky možné, stejně jako opakované elektrické šoky nepřivedou zpátky k životu mrtvolu.

Termodynamika je jedno z těch slov, kterým je v každé populární se tvářící knize lepší se vyhnout, avšak je mnohem zajímavější, pokud se na ni díváme jako na to, čím skutečně je: vědou o „touze“. Existence atomů a molekul se vyznačuje „přitažlivostí“, „odporem“, „potřebami“ a „uvolněním“ do té míry, že je takřka nemožné psát o chemii bez trochy vilného antropomorfismu. Molekuly „chtějí“ ztrácet či získávat elektrony, přitahovat opačný náboj, odpuzovat stejný náboj nebo se sdružovat s molekulami podobné povahy. K chemické reakci dochází spontánně, touží-li se jí všichni molekulární partneři zúčastnit; nebo je možné je větší silou donutit, aby se jí účastnili nedobrovolně. A některé molekuly by samozřejmě velice rády reagovaly, ale je pro ně těžké překonat svou vrozenou stydlivost. Trocha lehkého flirtování může uvolnit masivní vlnu chůčie, výboj čisté energie. Ale tady už bych snad měl přestat.

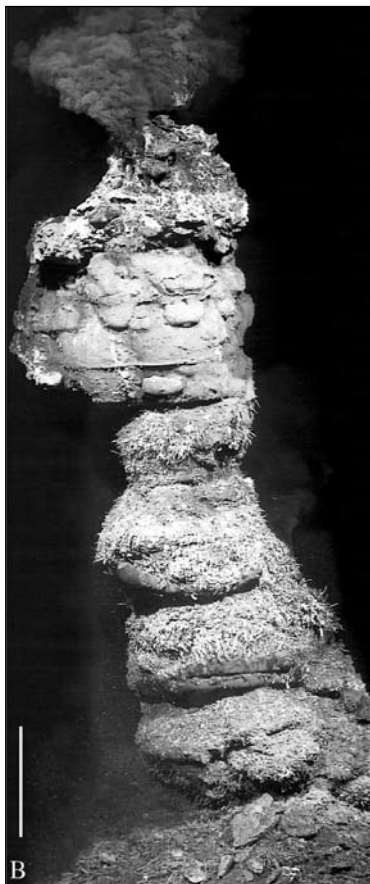
Jde mi o to, že termodynamika udržuje svět v chodu. Pokud spolu dvě molekuly nechtějí reagovat, pak je k tomu ani nelze snadno přesvědčit; pokud spolu reagovat chtějí, tak to taky udělají, i když jim může nějakou dobu trvat, než překonají stud. Takovéto snahy pohánějí i naše vlastní životy. Molekuly v potravinách by velice rády reagovaly s kyslíkem, ale naštěstí tak nečiní spontánně (trochu se stydí), jinak bychom všichni vzpláli jako pochodně. Ale plamen života, který nás všechny pomalu stravuje, je přitom přesně takovou reakcí: vodík získaný z jídla reaguje s kyslíkem a uvolňuje energii, kterou potřebujeme k životu¹. V podstatě veškerý život je poháněn podobným typem „hlavní reakce“: chemické reakce, která se chce uskutečnit a uvolňuje energii použitelnou k pohánění všech těch vedlejších reakcí, jež tvoří metabolismus. Veškerou tuto energii, celé naše životy lze shrnout do střetu dvou naprosto navzájem nevyvážených molekul,

vodíku a kyslíku: dvou protikladných těl, která se nakonec se silným výbojem prolnou v blaženém molekulárním spojení, po němž zbude jen trochu horké vody.

A to je ten zásadní problém prvotní polévky: je termodynamicky prázdná. Ničemu v polévce se nijak zvlášť nechce reagovat, alespoň ne tak jako vodíku s kyslíkem. Není v ní žádná nerovnováha, žádná hnací síla, která by tlačila život výš, výš a ještě výš do velice strmého energetického kopce tvorby skutečně složitých polymerů, jako jsou bílkoviny, tuky, polysacharidy a především RNA a DNA. Myšlenka, že replikátory jako RNA byly prvním výtvozem života ještě před tím, než mohla působit jakákoli termodynamická hnací síla, je, jak říká Mike Russell: „...jako vyndat z automobilu motor a čekat, že ho rozjede palubní počítač.“ Ale odkud se ten motor vzal, jestliže ne z polévky?

První náznak odpovědi se objevil na začátku 70. let, kdy byly v Galapážském riftu nedaleko Galapážských ostrovů zaznamenány vzestupné proudy teplé vody. Je příhodné, že ostrovy, jejichž bohatost kdysi přivedla Darwina k zamyšlení nad vznikem druhů, teď nabízely možnost zjistit, jak vznikl sám život.

Pár let se toho příliš nedělo. Ale v roce 1977, osm let poté, co Neil Armstrong vkročil na povrch Měsíce, se do trhliny ponořila americká výzkumná miniponorka Alvin. Pátrala po hydrotermálních oceánských průduších, které zřejmě měly stoupání teplé vody na svědomí, a také je našla. Ale zatímco jejich existence jen sotva někoho překvapila, nesmírná hojnost života v černočerné tmě riftu byla bez nadřázky šokující. Byly tam riftie hlubinné, některé až dva a půl metru dlouhé, a mezi nimi škeble a mušle o velikosti talířů. Obří živočichové žijící v hlubinách oceánů nebyli nic neobvyklého – vezměte si například obří oliheň – ale jejich ohromné množství zde bylo zarážející. Hlubokomořské průduchy se mohou co do hustoty osídlení směle měřit s deštnými lesy a korálovými pralesy, přestože spíše než sluneční energie je při životě udržuje činnost průduchů.



Obrázek 1.1 Vulkanický černý kuřák chrlící vodu o teplotě 350 °C na hřbetu Juana de Fuca v Severovýchodním Pacifiku. Značka vlevo představuje jeden metr.

Obrázek 1.2 Přírodní věž, třicetimetrový aktivní zásaditý průduch ve Ztraceném městě (Lost City), tyčící se ze serpentínového podloží. Aktivní oblasti jsou světlejší až bílé. Značka vlevo představuje jeden metr.

Snad nejpozoruhodnější ze všeho ale byly průduchy samotné, které brzy získaly přezdívku „černí kuřáci“ (viz Obrázek 1.1). Posléze se ukázalo, že průduchy v Galapážském riftu nejsou ve srovnání s některými z dalších 200 později objevených průduchových oblastí, rozptýlených po oceánských hřbetech v Tichém, Atlantickém a Indickém oceánu, nic zvláštního. Vratké černé komíny, z nichž některé jsou vysoké jako mrakodrapy, chrlí do oceánů nad sebou mračna černého kouře. Není to opravdový kouř, ale horká směs metalických sulfidů kyselá jako ocet, která vyvěrá z magmatické výhňe pod průduchy a v drtivém tlaku oceánských hlubin dosahuje teploty až 400 °C, než se v chladné vodě rozptýlí. Samotné komíny se skládají ze sirnatých minerálů, jako jsou pyrity (známější jako kočičí zlato), jež se uvolňují z černého kouře a v silných vrstvách pokrývají rozsáhlý prostor. Některé komíny rostou až překvapivě rychle, někdy i o třicet centimetrů za den, a než se zhroutí, mohou měřit i šedesát metrů.

Tento bizarní, izolovaný svět se zdál být obrazem pekla prosyceného sírou a odporným zápachem sirovodíku stoupajícího z kuřáků. Jistě jen zvrácená mysl Hieronyma Bosche by si zde představila riftie hlubinné, postrádající ústa i řitní otvor, a nesmírné množství bezokých garnátů, groteskně se hemžících u úpatí komínů jako záplava kobylek. Nejenže život v kuřácích tyto pekelné podmínky snáší, ale dokonce by bez nich ani nepřežil a díky nim vzkvétá. Ale jak to?

Odpověď spočívá v nerovnováze. Jak se mořská voda blíží k magmatu pod kuřáky, je zahřívána na vysokou teplotu a prosycována minerály i plyny, především pak sirovodíkem. Sirné bakterie pak z této směsi dovedou získávat vodík a pojit jej s oxidem uhličitým, čímž vzniká organická hmota. Tato reakce tvoří základ existence života v průduších a díky ní se bakteriím dobře daří i bez přímého přispění Slunce. Ale přeměna oxidu uhličitého na organickou hmotu vyžaduje energii, a aby ji sirné bakterie mohly vynaložit, potřebují kyslík. Svět průduchů pohání energie uvolňovaná při reakci sirovodíku s kyslíkem, která je rovnocenná reakci kyslíku s vodíkem, pohánějící naše vlastní životy. Výstupem reakce je i v tomto případě voda, ale

tentokrát i čistá síra jako z biblického pekla, podle níž získaly sirné bakterie své jméno.

Nezáleží na tom, že bakterie v průduších nemají pro teplo ani pro žádný jejich jiný produkt kromě sirovodíku využití². Ten plyn v podstatě není bohatý na energii; je to reakce s kyslíkem, co energii obstarává, a to už závisí na spojení průduchů s oceány – na spojení těchto dvou protikladných světů v dynamické nerovnováze. Jedině bakterie žijící přímo u průduchů, které čerpají z obou světů současně, mohou potřebné reakce provádět. Samotní průduchoví živočichové se buď popásají na bakteriálním porostu, jako to dělají průduchoví garnáti, nebo sami vlastním tělem bakterie vyživují, jako by je chovali na jakési své vnitřní farmě. To například vysvětluje, proč riftie hlubinné nepotřebují zažívací ústrojí; stáda bakterií je krmí zevnitř. Onen nekompromisní požadavek přísunu jak kyslíku, tak sirovodíku, ovšem staví zvířecí hostitele před jistá zajímavá dilemata, neboť je nutí v sobě skloubit něco málo z obou dvou světů. Právě z této nezbytnosti ve značné míře vychází podivná tělesná stavba riftií.

Netrvalo dlouho a životní podmínky ve světě průduchů přivábily pozornost vědců zabývajících se otázkou původu života, mezi prvními i oceánografa Johna Barosse z Washingtonské univerzity v Seatlu. Průduchy rázem vyřešily mnohé z problémů, s nimiž se potýkala teorie prvotní polévky, především pak problém termodynamiky; na chrleném černém kouři nebylo zhora nic rovnovážného. Spojení mezi průduchy a oceány by nicméně na mladé Zemi muselo fungovat odlišně, protože na ní tehdy buď nebyl vůbec žádný kyslík, nebo ho bylo jen velmi málo. Hnací silou tedy nemohla být reakce sirovodíku s kyslíkem, jako je tomu u respirace sirných bakterií v současnosti. Respirace na buněčné úrovni je na každý pád složitý proces, k jehož vyvinutí byl potřeba čas – nemohla tedy být tím prvotním zdrojem energie. Namísto toho se podle ikonoklastického německého chemika a patentního zástupce Güntera Wächtershäusera tím nejranějším motorem života stala reakce sirovodíku s železem, která dala vzniknout minerálnímu pyritu. K takové reakci dochází spontánně a do-

cháží při ní k uvolnění malého množství energie, kterou je alespoň v zásadě možné zachytit.

Wächtershäuser přišel s dosud nevídaným chemickým zdůvodněním vzniku života. Energie, uvolněná při tvorbě pyritu, na přeměnu oxidu uhličitého na organickou hmotu nestačila, a tak Wächtershäuser přišel s reaktivnějším prostředníkem – oxidem uhelnatým, plynem, který se v kyselých průduších skutečně vyskytuje. Zaměřil se i na další pomalé organické reakce s různými sirnoželezitými minerály, jež se zdály mít na průběh katalýzy zvláštní vliv. A konečně se Wächtershäuserovi a jeho kolegům podařilo mnoho z těchto teoretických reakcí provést v laboratoři, kde se projeví jako více než přesvědčivé. Byl to skutečně husarský kousek, který postavil desítky let staré nahlížení na možnosti vzniku života na hlavu a v pekelně nepříznivém prostředí ho vyčaroval z těch nejnečekanějších ingrediencí, především ze sirovodíku, oxidu uhelnatého a pyritu – tedy z dvojice jedovatých plynů a z kočičího zlata. Jistý vědec poté, co si Wächtershäuserovu práci poprvé přečetl, poznamenal, že je to jako kdyby propadla trhlinou v čase z konce jednadvacátého století.

Ale měl Wächtershäuser pravdu? Snesla se na něj i tvrdá kritika – částečně proto, že je od přírody rebel a že boří zažitě myšlenky, částečně proto, že své kolegy pobuřoval svou domýšlivostí, a částečně proto, že o jeho teorii existují oprávněné pochybnosti. Asi nejhůře selhává v otázce „problému koncentrace“, jímž trpí i idea prvotní polévky. Veškeré organické molekuly by se v oceánu nutně rozptýlily a tak je velice nepravděpodobné, že by se kdy vůbec setkaly a následnou reakcí vytvořily polymery jako DNA a RNA. Nebylo by nic, co by je drželo pohromadě. Wächtershäuser oponuje tvrzením, že veškeré jeho reakce mohly proběhnout na povrchu minerálů, jako jsou pyrity. Ale i s tím naráží na problém, tentokrát na skutečnost, že reakce nemožnou proběhnout až do konce, aniž by se jejich výsledné produkty od povrchu katalyzátoru oddělily. Všechno se buď spojí, nebo rozloží³.

Mike Russell, v současnosti pracovník Laboratoře tryskových pohonů v Pasadeně, přišel uprostřed 80. let s řešením všech zmíněných

problémů. Russell by se dal nazvat prorockým bardem vědy se sklony ke „geopoezii“, jehož názor na původ života s kořeny v geochemii a termodynamice se mnoha biochemikům zdá být přinejmenším podivný. Ale Russellovy myšlenky si i přesto v průběhu následujících desetiletí získaly rostoucí skupinu příznivců, kteří v jeho vizi spatřují jedinečně funkční řešení otázky vzniku života.

Jak Wächtershäuser, tak Russell se shodují na tom, že při vzniku života sehrály ústřední roli hydrotermální průduchy, ovšem když odhlédneme od této shody, pak jeden vidí černou tam, kde druhý bílou; jeden hlásá význam sopečné činnosti, druhý jejího protikladu; jeden vyzdvihuje kyseliny, druhý zásady. Přestože jsou tyto myšlenky někdy zaměňovány, mají toho až pozoruhodně málo společného. Dovolte, abych to vysvětlil.

Oceánské hřbety, domov černých kuřáků, jsou současně místem, odkud se šíří nové mořské dno. U těchto center sopečné aktivity stoupající magma pomalu, rychlostí, s jakou rostou nehty, odsouvá tektonické desky. Jak do sebe potom šinoucí se desky nesmírně daleko narážejí, noří se jedna z nich pod druhou, zatímco se ta druhá zmítá v panických křečích. Himaláje, Andy, Alpy, všechna tato pohoří vyrostla ze země díky srážení tektonických desek. Pomalý pohyb zemské kůry po mořském dně nicméně i odhaluje nové skály vynořivší se ze zemského pláště, vrstvy pod kůrou. Na takových skalách se pak tyčí hydrotermální průduchy jiného druhu, silně se lišícího od černých kuřáků, a právě jim dává Russell přednost.

Tento druhý typ průduchů není sopečného původu a nemá nic společného s magmatem. Namísto toho závisí jejich vznik jen a pouze na reakci čerstvě odhalené skály s mořskou vodou. Voda nejenže do takových skal prosakuje, ona s nimi přímo fyzicky reaguje; slučuje se s nimi a přitom mění jejich strukturu tak, že vznikají minerální hydroxidy, jako je serpentín (pojmenovaný podle podoby s kropenatě zelenými plazími šupinami). Reakce s mořskou vodou způsobuje, že skála zvětšuje svůj objem, praská a láme se, což zase umožňuje, aby

do ní v nekonečné smyčce pronikalo ještě více mořské vody. Měřítko, v němž takovéto reakce probíhají, je ohromující. Panuje přesvědčení, že objem vody, takto navázané na skálu, se vyrovná objemu vody v samotných oceánech. Jak se oceánské dno rozšiřuje, tyto zvětšené, hydratované skály se nakonec znovu zanoří pod narážející zemskou desku, kde jsou v plášti znovu zahřáty na nesmírně vysokou teplotu. V tomto okamžiku se své vody vzdávají a uvolňují ji do zemských útrob. Toto zaplavování mořskou vodou pohání hluboko v plášti koloběh konvektivního proudění, které tlačí magma v oblasti středo-oceánských hřbetů a sopek zpět k povrchu. A tak je bouřlivá sopečná činnost naší planety z velké části poháněna nepřetržitým průtokem mořské vody skrz zemský plášť. Tento proces udržuje náš svět mimo rovnováhu. Povrch Země se neustále převrací.

Ale reakce mořské vody se skalami, vynořivšími se z pláště, kromě poskytování hnací síly pro neutuchající sopečnou činnost dělá ještě něco. Uvolňuje se při ní také energie ve formě tepla spolu se značným množstvím plynů, například vodíku. Ona reakce vlastně přetváří vše, co se v mořské vodě rozložilo, a jako pokřivené kouzelné zrcadlo odráží nazpět groteskně odulé obrazy, na nichž jsou všechny reaktanty obtěžkané elektrony (odborně řečeno jsou „redukovány“). Plyn, který při této reakci vzniká především, je vodík – jednoduše proto, že mořská voda se z větší části skládá z vody; ale v menších množstvích se objevují i různé jiné plyny, připomínající ty, jež obsahovala směs Stanleyho Millera, a které se tolik hodí pro vytvoření předchůdců složitých molekul, jako jsou bílkoviny a DNA. Tak se oxid uhličitý proměňuje v metan, dusík se vrací v podobě čpavku a síran je chrlen nazpátek jako sirovodík.

Teplu a plyny vystoupají až k povrchu, kde si prorazí cestu jako druhý typ hydrotermálního průduchu. Tyto průduchy se od černých kuřáků liší takřka v každém ohledu. Nejsou kyselé, namísto toho bývají silně zásadité. Jsou teplé nebo přímo horké, ale ani zdaleka nedosahují ďábelsky vysokých teplot černých kuřáků. Obvykle se vyskytují dál od středo-oceánských hřbetů, v místech, kde se šíří nové

dno. A místo aby vytvářely vertikální černé komíny s jediným ústím, kterým by se valil černý dým, tvoří složité konstrukce protkané nepatrnými bublinami a komůrkami, jež se usazují, zatímco se teplé zásadité hydrotermální tekutiny mísí s chladnou mořskou vodou nad nimi. Řekl bych, že příčina toho, že o tomto druhu průduchů vědí jen nemnozí, souvisí s odrazujícím pojmem „serpentinizace“ (opět odvozeného od nerostu jménem serpentín). Pro naše účely postačí, budeme-li je jednoduše nazývat „zásadité průduchy“, přestože to ve srovnání s barvitou úderností „černých kuřáků“ zní poněkud nenápaditě. K plnému významu slova „zásadité“ se dostaneme později.

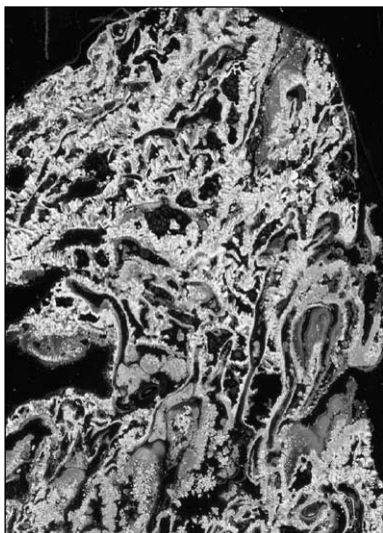
Zajímavé je, že až donedávna se existence zásaditých průduchů v zásadě předpokládala, ale vědělo se o nich jen z několika zkamenělin. Ta nejslavnější z nich, pocházející z irského Tynaghu, je kolem 350 milionů let stará a Mikea Russella přivedla v 80. letech k zamyšlení. Když prozkoumal tenké pláty pórovité skály z okolí zkamenělého průduchu pod elektronovým mikroskopem, zjistil, že velikost oněch nejvýše desetinu milimetru měřících drobných komůrek v nich, propojených do labyrintu podobných sítí, odpovídá velikosti organických buněk. Předpokládal, že podobné minerální komůrky mohou vznikat při mísení zásaditých tekutin z průduchu s kyselou mořskou vodou, a brzy úspěšně vytvořil útvary z porézního kamene smísením kyselin se zásadami v laboratoři. V dopisu do prestižního časopisu *Nature* z roku 1988 Russell uvedl, že podmínky v zásaditých průduších z nich dělají ideální prostředí pro vznik života. Komůrky poskytly přirozený prostor ke koncentraci organických molekul, zatímco jejich stěny, složené ze sirnoželezitých minerálů jako je například macinawit, propůjčily komůrkám katalytické vlastnosti, s nimiž počítal Günter Wächtershäuser. Ve své práci z roku 1994 došel Russell se svými kolegy k následujícímu závěru:

„Život se vynořil z rostoucích shluků pyritových komor obsahujících zásady a silně zredukované hydrotermální roztoky. Tyto komory vznikly hydrostatickým působením v podmořských

horkých sirných pramenech nacházejících se v určité vzdálenosti od míst šíření oceánského dna před 4 miliardami let.“

Ta slova byla skutečně vizionářská, neboť v té době ještě žádný činný hlubokomořský zásaditý průduch nebyl objeven. Až později, na přelomu tisíciletí, vědci na palubě výzkumné ponorky Atlantis přesně na takový druh průduchu narazili asi patnáct kilometrů od Středoatlantického hřbetu, na podmořské hoře shodou okolností zvané Atlantský masiv. To jméno bylo až strašidelně přiléhavé i díky Ztracenému městu, pojmenovanému po legendární metropoli, a jeho jemným bílým sloupům a uhlčitanovým prstům vypínajícím se do černočerné tmy. Průduchová oblast se nepodobala ničemu dosud objevenému. Některé z komínů byly stejně vysoké jako černí kuřáci, přičemž ten nejvyšší z nich, přezdívaný Poseidon, se hrdě tyčil do výše šedesáti metrů. Ale tyto křehké prsty měly k netečně mohutné konstrukci kuřáků daleko; namísto toho byly zdobné jako gotické stavby, pokryté „hloupými čmáranicemi“, jak to řekl John Julius Norwich. Hydrotermální výpary tu byly bezbarvé a město vypadalo, jako by bylo v okamžiku opuštěno a navěky zachováno v celé své složité, gotické nádheře. Nebylo to peklo plné černých kuřáků, namísto nich tu byli jemní bílí nekuřáci, ukazující svými zkamenělými prsty k nebi (viz Obrázek 1.2).

Výpary sice byly bezbarvé, avšak skutečně byly více než dost a postačovaly k tomu, aby udržely město při životě. Komíny se neskládají ze sirnoželezitých minerálů (v oceánech bohatých na kyslík se železo takřka nerozptyluje; Russellovy předpovědi se váží k podstatně dávnějším časům), ovšem jejich struktura je i tak porézní – je to účinné bludiště mikroskopických komůrek se stěnami z nadýchaného aragonitu (viz Obrázek 1.3). Za povšimnutí stojí, že staré komíny, které už utichly a nepřekypují hydrotermálními tekutinami, jsou mnohem pevnější, neboť se jejich póry zanesly vápencem. Oproti tomu žijící průduchy jsou skutečně doslova živé a v jejich pórech to vře horečnatou bakteriální aktivitou, která beze zbytku využívá panující chemické nerovnováhy. Jsou zde i zvířata a svou



Obrázek 1.3 Mikroskopická struktura zásaditého průduchu ukazuje propletené komůrky, které skýtají ideální podmínky pro vznik života. Úsek na obrázku je asi centimetr široký a třicet mikronů silný.

rozmanitostí si ničím nezadají s faunou černých kuřáků, přestože pokud jde o velikost, jsou na tom podstatně hůře. Příčinou se zdá být ekologie. Sirné bakterie, jimž se tak daří v černých kuřácích, se pohotově přizpůsobují životu uvnitř svých zvířecích hostitelů, zatímco bakterie (nebo přesněji archea) nalezené ve Ztraceném městě taková partnerství nevytvářejí.⁵ Bez vnitřních „farem“ průduchoví živočichové tolik nerostou.

Život ve Ztraceném městě staví na reakci vodíku s oxidem uhličitým, tedy v podstatě na stejných základech jako veškerý život na planetě. Pozoruhodná je však skutečnost, že ve Ztraceném městě je tato reakce přímá, zatímco prakticky ve všech ostatních případech je nepřímá. Surový vodík, vybublávající ze země v plynném skupenství, je na naší planetě vzácností a život si zpravidla musí vystačit se skrytými zásobami, těsně připoutanými molekulárním sevřením k jiným atomům, například ve vodě nebo v sirovodíku. Vyrvat z takových molekul vodík a navázat ho na oxid uhličitý stojí energii – energii, která buď musí být nutně získávána od slunce prostřednictvím fo-

tosyntézy, nebo musí pocházet z chemické nerovnováhy vládající ve světě průduchů. Jen pokud je k dispozici plynný vodík, tak reakce proběhne spontánně, i když jen velmi pomalu. Ale z termodynamického hlediska je taková reakce oběd zdarma, za jehož sněžení ještě dostanete zaplacené (podle památných slov Everetta Shocka). Jinak řečeno, reakce přímo vytváří organické molekuly a současně uvolňuje významné množství energie, které může být v zásadě využito k pohánění dalších organických reakcí.

Takže Russellovy zásadité průduchy vyhovují požadavkům na líheň, z níž se vyklubal život. Jsou nedílnou součástí systému, jehož chodem se povrch naší planety neustále převrací a pohání tak neutuchající sopečnou činnost. Neustále se nacházejí mimo rovnováhu s oceány, do nichž vhánějí stálý proud vodíku, který v reakci s oxidem uhličitým vytváří organické molekuly. Tvoří labyrint porézních komůrek, v nichž jsou vytvořené organické molekuly zadržovány a koncentrovány a kde je pravděpodobnost, že zformují polymery jako RNA, mnohem vyšší (jak uvidíme v další kapitole). Jsou dlouhověké – komíny Ztraceného města jsou činné už 40 000 let, tedy o dva řády déle než většina černých kuřáků. A na mladé Zemi, kde se chladnoucí plášť častěji dostával do přímého kontaktu s oceány, se vyskytovaly hojněji. Tehdy byly také oceány plné rozptýleného železa a mikrokomůrky měly katalytické stěny složené ze sirnoželezitých minerálů, jako tomu je u zkamenělých průduchů z Tynaghu v Irsku. Vlastně by fungovaly jako přírodní průtokové reaktory, v nichž by tepelné a elektrochemické gradienty poháněly oběh reaktivních tekutin skrze katalytické komory.

Potud je vše v pořádku, ale jediný reaktor, byť sebeznamenitější, dá životu vzniknout jen zřídka. Jak mohl život od takových přírodních reaktorů pokročit až k oné zázračně důvtipné a vynalézavé tapiserii života, kterou kolem sebe vidíme? Odpověď na tuto otázku samozřejmě neznáme, ale určitá vodítka lze vyvodit z vlastností života jako takového, především pak z jádra zakonzervovaných reakcí společných veškerému životu na dnešní Zemi. Toto jádro metabolis-

mu, žívoucí niterná fosílie, v sobě zachovává pozůstatky nejdávnější minulosti, odpovídající počátkům v zásaditém hydrotermálním průduchu.

K otázce vzniku života lze přistupovat ze dvou směrů: „zdola nahoru“ a „shora dolů“. Až doposud jsme se v této kapitole pohybovali „zdola nahoru“ a zvažovali geochemické podmínky a termodynamické hnací síly, které nejspíše existovaly na mladé Zemi. Jako nejvhodnější prostředí pro vznik života jsme určili hlubokomořské hydrotermální průduchy, jimiž do oceánu nasyceného oxidem uhlíčitým pronikal plynňý vodík. Přírodní elektrochemické reaktory by dovedly vytvářet jak organické molekuly, tak energii; ale ještě jsme se nedopátrali odpovědi na otázku, k jakým přesně reakcím nejspíše došlo a jak se jejich působením život vyvinul do podoby, v jaké ho známe dnes.

Jediným skutečně přijatelným způsobem jak zjistit, proč je dnes život takový, jaký je, je přístup směrem „shora dolů“. Můžeme vytvořit přehled vlastností sdílených vším živým a s jejich pomocí zrekonstruovat hypotetické vlastnosti Posledního univerzálního společného předka, známého pod anglickou zkratkou LUCA. Například tedy kvůli tomu, že jen malá část bakterií je schopna provádět fotosyntézu, je nepravděpodobné, že toho byl schopný sám LUCA. Kdyby tomu přesto tak bylo, pak by se většina jeho následníků musela této cené dovednosti vzdát, což se zdá být přinejmenším nepravděpodobné, přestože s jistotou to vyloučit nelze. Obdobně lze říct, že veškerý život na Zemi sdílí jisté společné vlastnosti: všechno živé se skládá z buněk (kromě virů, které do buněk pronikají); všechny buňky mají geny složené z DNA; všechny kódují bílkoviny jakýmsi univerzálním kódem používaným pro určité aminokyseliny. A všechno živé používá společnou energetickou měnu, známou jako ATP (adenosintrifosfát), která funguje podobně jako desetilibrová bankovka, s níž lze v rámci buňky „platit“ za celou řadu různých služeb (což podrobněji rozebereme později). Logicky lze usuzovat, že veškeré živé organismy zdědily své

společné vlastnosti po onom jediném vzdáleném společném předkovi, jímž byl LUCA.

Veškerý současný život rovněž sdílí určité společné jádro metabolických reakcí. V jejich centru se nachází drobný cyklus reakcí, pojmenovaný Krebsův cyklus po Siru Hansi Krebsovi, německém laureátu Nobelovy ceny, jenž v Sheffieldu ve 30. letech po svém útěku před nacisty jako první fungování cyklu popsal. Krebsův cyklus zaujímá v biochemii význačné místo, nicméně celé generace studentů jej měly za ukázkou toho nejhoršího, obstarožního biochemického dějepisu, kterou se před zkouškami naučily nazpaměť a pak ji zase zapomněly.

Na Krebsovu cyklus je však přesto cosi kultovního. Na stěnách stísněných kabinetů v odděleních biochemie – v takových těch kabinetech, kde na stole stojí hromady knih a štosy papírů, přepadávajících na podlahu a do koše, který už alespoň deset let nikdo nevynesl – často najdete připíchnuté vybledlé, zkroucené schéma metabolismu se zohýbanými rohy. Se směsicí hrůzy a fascinace na ně zůstanete civět, zatímco čekáte, až se vrátí profesor. Jeho složitost je strašlivá, vypadá jako pokus nějakého šílence namalovat plánek metra a všemi směry se po něm táhnou malé šipky, které se pak zase stáčeji jedna ke druhé. I když jsou vybledlé, ještě tak tak rozpoznáte, že všechny ony šipky mají různé barvy pro různé trasy – červená pro bílkoviny, zelená pro tuky a tak dále. O kousek blíže k dolnímu okraji, kde nějakým záhadným způsobem vzbuzuje dojem, že se nachází přesně uprostřed té anarchické změti šipek, je malý kroužek, snad jediný kruh nebo spíše jediný spořádaný úsek celého schématu. To je on, Krebsův cyklus. A jak se tak na něj díváte, začnete si uvědomovat, že vlastně všechny další šipky po celém schématu se stáčeji od Krebsova cyklu pryč, jako paprsky polámaného kola. Je to střed všeho, metabolické jádro buňky.

Krebsův cyklus se už zdaleka nezdá být tak obstarožní. Současné medicínské výzkumy ukázaly, že se nachází v centru jak biochemie, tak fyziologie buňky. Změny v oběhové rychlosti cyklu ovlivňují

vše od stárnutí přes rakovinu až po hladinu energie. Ale jako ještě mnohem překvapivější se ukázalo zjištění, že Krebsův cyklus zvládá i zpětný chod. Za obvyklých okolností cyklus spotřebovává organické molekuly (z potravy) a jeho výstupy jsou vodík (jehož účelem je být při respiraci spálen s kyslíkem) a oxid uhličitý. Cyklus tedy nejenže poskytuje prekurzory pro metabolické procesy, ale také produkuje malé dávky vodíku potřebné k vytváření energie ve formě ATP. Pokud jde o pozpátku, dělá Krebsův cyklus pravý opak: nasává oxid uhličitý i vodík a vytváří z nich nové organické molekuly, stavební kameny života. A namísto toho, aby se z něj za chodu uvolňovala energie, spotřebovává při zpětném fungování ATP. Dodejte tedy cyklu ATP, oxid uhličitý a vodík a jako mávnutím kouzelného proutku dostanete základní stavební materiál života.

Tento zpětný chod Krebsova cyklu není příliš rozšířený dokonce ani mezi bakteriemi, ale je poměrně běžný mezi bakteriemi žijícími v hydrotermálních průduších. Očividně jde o významný, i když primitivní způsob přeměny oxidu uhličitého ve stavební kameny života. Průkopnický biochemik z Yale, Harold Morowitz, jenž teď pracuje v Krasnowském institutu pokročilého výzkumu ve Fairfaxu ve Virginii, vlastnosti zpětného Krebsova cyklu několik let zkoumal. V širším smyslu lze z jeho závěrů říct, že pokud má k dispozici veškeré ingredience v dostatečné koncentraci, funguje cyklus sám. Je to kyblíková chemie. Pokud se koncentrace jednoho materiálu začne zvyšovat, bude mít sklon se přeměnit na druhý materiál. Ze všech možných organických molekul jsou to ty z Krebsova cyklu, které jsou nejnestabilnější, a tedy je jejich vznik nejpravděpodobnější. Jinými slovy, Krebsův cyklus „nevynalezly“ geny, jde jen o pravděpodobnostní chemii a termodynamiku. Když se geny o něco později vyvinuly, držely se schématu, jež už existovalo, podobně jako dirigent orchestru, který se stará o interpretaci – o tempo a intonaci – ale to, jak je hudba napsaná, neovlivní. Ona hudba, hudba sfér, tu byla celou dobu.

Jakmile se Krebsův cyklus jednou rozběhl a začal produkovat energii, takřka nevyhnutelně začalo docházet k vedlejšími reakcím,

z nichž vzešly složitější prekurzory jako aminokyseliny a nukleotidy. Otázka, jak velká část z jádra metabolismu života na Zemi vznikla spontánně a jak velkou část později vytvořily geny a proteiny, je jistě zajímavá, nicméně mimo záběr knihy, jako je tato. Dovolím si ale jednu všeobecnou poznámku. Drtivá většina pokusů, v nichž šlo o umělé vytvoření stavebních kamenů života, byla příliš „puristická“. Takové pokusy začínají s jednoduchými molekulami jako je kyanid, které s chemií života tak, jak ho známe, nemají nic společného (vlastně jsou mu protikladné). Pak se snaží uměle vytvořit materiál, z něhož je život postaven, tím, že si pohrávají s faktory, jako jsou tlak, teplota nebo elektrické výboje, které jsou všechny naprosto nebiologické. Ale co se stane, když začnete s molekulami z Krebsova cyklu a nějakými ATP, ideálně v elektrochemickém reaktoru, jak to navrhl Mike Russell? Jak velká část z našeho metabolického schématu se zohýbanými rohy se z těchto ingrediencí samovolně vynoří jako jakási nadpозemská forma, která se postupně zaplní termodynamicky nejpravděpodobnějšími molekulami? Nejsem jediný, kdo by řekl, že ta část bude poměrně velká, snad až k úrovni menších bílkovin (přesně řečeno polypeptidů) a RNA, kde už se začne v rozhodující míře uplatňovat přirozený výběr.

To vše je věcí experimentů; a tyto experimenty je zpravidla teprve nutné provést. Mají-li být realistické, potřebujeme stabilní produkci ATP, oné magické přísady. A v tomto bodě se vám může zdát, že předbíháme, že se snažíme běžet ještě dříve, než se vůbec naučíme chodit. Jak vytvoříme ATP? Odpověď, kterou považuji za nejperspektivnější, pochází od brilantního, i když někdy až přehnaně přímočarého amerického biochemika Billa Martina, jenž dal Spojeným státům sbohem, aby se ujal místa profesora botaniky na Düsseldorfské univerzitě. Od té chvíle se Martin stal zdrojem neutuchajícího přílivu revolučních teorií o původu téměř všeho, co v biologii hraje nějakou roli. V některých z nich se může mýlit, přesto jsou ale vždy strhující a skoro každého přimějí podívat se na biologii z jiného úhlu. Před pár lety se Martin setkal s Mikem Russellem a společně napadli přechod

od geochemie k biochemii. Od té doby se jejich myšlenkový proud nezastavil. Pojdme se jím nechat kousek unést.

Martin a Russell se vydali zpátky ke kořenům: k přísunu uhlíku do organického světa. Dnes, jak poznamenávají, existuje jen pět metabolismických procesů, jimiž rostliny a bakterie zásobují žijící svět vodíkem a oxidem uhličitým potřebnými k vytváření organické hmoty, přičemž jeden z nich, jak jsme si již vysvětlili, je obrácený Krebsův cyklus. Ostatní čtyři z pěti procesů (stejně jako Krebsův cyklus) spotřebovávají ATP a mohou se tedy odehrávat jen tehdy, mají-li přísun energie. Ovšem pátý proces, přímočará reakce vodíku s oxidem uhličitým, nejenže vytváří organické molekuly, ale také se při ní uvolňuje energie. Přesně to v sérii vzdáleně podobných kroků dělají dvě skupiny starobylých organismů. A s jednou z těchto dvou skupin jsme se již potkali – jsou to „archea“, kterým se daří v průduchové oblasti Ztraceného města.

Mají-li Martin s Russellem pravdu, pak vzdálení předci těchto archeí prováděli ten samý sled reakcí v prakticky identickém prostředí před 4 miliony let, na úsvitu života. Ale reakce vodíku s oxidem uhličitým není zdaleka tak přímočará, jak to zní, neboť tyto dvě molekuly spolu spontánně nereagují. Jsou poměrně „stydlivé“ a k tanci je musí přesvědčit katalyzátor; a aby se do toho daly, potřebují také přísun malého množství energie. Jen pak se ty dvě molekuly spojí a uvolní přitom ještě více energie. Katalyzátor je jednoduchý až až. Enzymy, které reakci slouží jako katalyzátor dnes, obsahují ve svých jádrech drobné shluky železa, niklu a síry se strukturou velice podobnou minerálům, nalezeným v průduších. To naznačuje, že prvotní buňky v sobě jednoduše obsahovaly už připravený katalyzátor, což ukazuje na nesmírnou starobylost procesu, neboť to s sebou nenese nutnost vývoje sofistikovaných bílkovin. Podle Martina a Russella stojí proces na kamenných základech.

Zdrojem energie, potřebným k roztlačení koule ze svahu, se alespoň ve světě průduchů ukázaly být průduchy samotné. Jeden nečeka-

ný produkt reakce jim uniká: reaktivní forma octa známá jako acetylthioester⁶. Acetylthioestery se tvoří proto, že oxid uhličitý je poměrně stabilní a odolává náporu vodíku, ale na druhou stranu je zranitelný vůči reaktivnějším „volným radikálům“, částecům uhlíku nebo síry, které se v průduších nacházejí. V podstatě platí, že energie potřebná k přesvědčení oxidu uhličitého k reakci s vodíkem vychází ve formě reaktivních volných radikálů ze samotných průduchů, které dávají vzniknout acetylthioesterům.

Acetylthioestery jsou významné, neboť figurují u prastarého bodu, v němž se větví metabolismus, který lze nalézt ještě v dnešních organismech. Když oxid uhličitý reaguje s acetylthioesterem, je zvolena větev vedoucí k tvorbě složitějších organických molekul. K této reakci dochází spontánně a uvolňuje se při ní energie, přičemž výsledkem je trojuhlíková molekula zvaná pyruvát (kyselina pyrohroznová). Při zaslechnutí jména téhle molekuly by měli biochemici zpozornět, protože jde o vstup do Krebsova cyklu. Jinými slovy, několik jednoduchých reakcí, z nichž všechny jsou termodynamicky příhodné a některé jsou katalyzovány enzymy s minerálovitými shluky v jádrech, které jim dávají ony „kamenné základy“, nás bez okolků dostává přímo do metabolického centra života, do Krebsova cyklu. A jakmile jednou pronikneme do Krebsova cyklu, potřebujeme už jen stálý přísun ATP, abychom ho rozběhli a začali s výrobou stavebních kamenů života.

Energii poskytuje druhá větev, na které fosfát reaguje s jiným acetylthioesterem. Ta reakce sice neprodukuje ATP, ale vytváří jejich jednodušší formu zvanou acetylfosfáty. Ty slouží v podstatě stejnému účelu a některé bakterie je i v současnosti používají spolu s ATP: předávají svou reaktivní fosfátovou skupinu dalším molekulám a tím jim dávají energetický impuls, jenž je následně aktivuje. Tento proces se trochu podobá dětské hře na honěnou, v níž jedno z dětí honí ostatní, a když se dotkne druhého, přenesení ten úkol na něj. Dítě, které má ostatní honit, získává „reaktivitu“, kterou předává jinému. Přesun fosfátu z jedné molekuly na druhou funguje velice podobně: reaktiv-

ní dotyk aktivuje molekuly, jež by jinak nereagovaly. Tak mohou ATP nastavit Krebsovu cyklu zpětný chod a acetylfosfáty dělají úplně to samé. Odpad vznikající poté, co je reaktivní fosfátová „baba“ předána, je čistý ocet, běžný produkt dnešních bakterií. Až příště otevřete láhev vína, které zkyslo (v procesu přeměny v ocet), pomyslete na bakterie, které se v láhvi činí a vytvářejí odpadní produkt starý jako život sám, odpad mnohem účtyhodnější než to nejlepší víno.

Pokud tyto informace spojíme, zjistíme, že zásadité hydrotermální průduchy nepřetržitě vytvářejí acetylthioestery, což umožňuje počátek tvorby složitějších organických molekul i energie k tomu potřebné, to vše v podobě v zásadě stejné, jakou používají i dnešní bakterie. Minerální komůrky, jimiž jsou komíny protkané, současně poskytují jak koncentraci výstupních produktů, která podobným reakcím prospívá, tak katalyzátory nezbytné k urychlení celého procesu, aniž by byly v tomto stádiu potřeba složité bílkoviny. A konečně, probublávání vodíku i jiných plynů do labyrintu minerálních komůrek znamená, že všechny používané suroviny se neustále obnovují a důkladně se promíchávají. Je to učiněná fontána života, tedy až na jednu neodbytnou drobnost s dalekosáhlými důsledky.

Onen problém souvisí s tím malým energetickým impulsem nutným k prvnímu sblížení vodíku a oxidu uhličitého. Již jsem se zmínil o tom, že problém nespočívá v samotných průduších, protože jejich hydrotermální podmínky tvoří reaktivní volné radikály, které celý proces nastartují. Ale je to problém pro buňky volně žijící mimo průduchy. Ty musí místo toho na začátku utratit ATP, jako se na první schůzce prolamují ledy pozváním na skleničku. Kde je v tom problém? Nesedí účetnictví. Při reakci vodíku s oxidem uhličitým se uvolňuje dostatek energie k vytvoření jedné molekuly ATP. Ale musíte-li k vytvoření jedné ATP jednu ATP utratit, neplyne z toho žádný zisk. A bez zisku nemá co nastartovat Krebsův cyklus a zahájit tvorbu složitých organických molekul. Život mohl v průduších započnout, ale pak měl zůstat k průduchům navěky připoután jakousi nepřerušitelnou termodynamickou pupeční šňůrou.

Ovšem život očividně k průduchům připoutaný není. Není-li celá tato úvaha klamná, jak jsme tomu osudu unikli? Odpověď, kterou předložili Martin a Russell, je úchvatná, neboť vysvětluje, proč prakticky všechen dnešní život využívá stejné charakteristické metody respirace k produkování energie v tom snad vůbec nejzvláštnějším a nejnečekanějším mechanismu v celé biologii.

Ve Stopařově průvodci po Galaxii zoufale nešikovní předkové moderních lidí ztroskotají na planetě Zemi a zaujmou místo tamních opolidí. Sestaví podvýbor pro znovuvynalezení kola a jako měnu zvolí listy, díky čemuž všichni nesmírně zbohatnou. Ale narazí na závažný problém, kterým je inflace, kvůli níž jsou ke koupi jediného arašidu z lodi potřeba asi tři opadavé lesy. Takže naši předkové zahájí rozsáhlý deflační program a všechny lesy spálí. Zní to až děsivě reálně.

Když pomínu jistou lehkovážnost, pak soudím, že na tomto popisu povahy měny něco je – neměli vůbec nic, co by ukotvilo hodnotu. Arašid může mít cenu zlaté cihly, jedné pence nebo tří opadavých lesů; všechno závisí na relativním ocenění, vzácnosti a tak podobně. Desetilibrová bankovka může stát, kolik chce. Ale v chemii tomu tak není. O něco dříve jsem přirovnal ATP k desetilibrové bankovce a tu hodnotu jsem nezvolil náhodou. Energie vazeb v ATP je taková, že je k výrobě jednoho ATP potřeba utratit deset liber, a když tak učiníte, dostanete nazpět přesně deset liber. Hodnota tu není relativní, jak je tomu s lidskou měnou. A v tom tkví základní problém všech bakterií, které se pokusí opustit průduchy. ATP není tak univerzálním plati-dlem jako desetilibrová bankovka, jeho hodnota je neměnná a v jeho případě není nic jako drobné. Chcete-li s cílem prolomit ledy na první schůzi koupit laciné pití, musíte tak zaplatit svou desetilibrovkou a i když nápoj stál jen dvě libry, žádné drobné nedostanete – nic jako pětina molekuly ATP totiž neexistuje. A když zachytíte energii uvolněnou při reakci vodíku s oxidem uhličitým, můžete ji uložit jen ve formě desetilibrových bankovek. Řekněme tedy, že byste v zásadě

mohli z reakce získat osmnáct liber; to na dva ATP nestačí, takže si musíte vyrobit jen jeden. Přijdete o osm liber, protože nic jako drobné neexistuje. Většina z nás se s obdobně otravnými obtížemi setkává ve směnárnách, pracujících jen s vysokými hodnotami.

Vzato kolem a kolem, i přesto, že pro začátek potřebujete dvě libry a předtím jste mohli získat osmnáct liber, pak v případě, že musíte použít naši univerzální desetilibrovku, vám nezbyvá než utratit deset liber a deset liber vydělat. Bakterie se této rovnici nedovedou vyhnout: žádná nemůže růst přímou reakcí vodíku s oxidem uhlíčitým jen s využitím ATP. A přesto rostou, přičemž využívají důmyslnou metodu rozložení desetilibrové bankovky do menších částek, metodu známou pod působivým názvem chemiosmóza. Ta vynesla svému hlavnímu interpretu, britskému biochemiku Peteru Mitchellovi, v roce 1978 Nobelovu cenu. Ocenění konečně ukončilo desítky let ostrých rozepří. Dnes, kdy se na něj díváme z perspektivy nového tisíciletí, vidíme, že se Mitchellův objev řadí mezi ty nejvýznamnější dvacátého století.⁷ Ale dokonce i těch nemnoho vědců, kteří dlouho zdůrazňovali význam chemiosmózy, jen obtížně vysvětluje, proč by měl tak podivný mechanismus být v životě všudypřítomný. Stejně jako univerzální genetický kód, Krebsův cyklus a ATP, tak i chemiosmóza se nachází ve veškerém životě a zdá se, že patřila k vlastnostem Posledního univerzálního společného předka neboli LUCA. Martin a Russell ozřejmili proč.

V nejširším slova smyslu je chemiosmóza pohybem protonů přes membránu (odsud pochází odkaz na osmózu, kde přes membránu prochází voda). Při respiraci se děje následující. Elektronů jsou odebírány z jídla a dlouhý řetěz nosičů je dopraví ke kyslíku. Na několika místech uvolňovaná energie se používá k pumpování protonů přes membránu. Ve výsledku protony membránou procházejí. Membrána funguje trochu jako přehrada s vodní elektrárnou. Tak jako voda, proudící z náhorní nádrže, pohání turbínu a vyrábí tak elektřinu, tak i v buňkách tok protonů bílkovinnými turbínami v membráně pohání syntézu ATP. Existenci tohoto mechanismu nikdo nečekal: namísto

pěkně přímočaré reakce mezi dvěma molekulami mezi nimi funguje zvláštní protonový gradient.

Chemici jsou zvyklí pracovat s celými čísly – pro jednu molekulu není možné reagovat jen s polovinou druhé molekuly. Snad tím nejvíce matoucím aspektem chemiosmózy jsou všechny ty zlomky celých čísel, kterými se to v ní jen hemží. Kolik elektronů je třeba přesunout k vytvoření jednoho ATP? Něco mezi 8 a 9. A kolik protonů? Dosud nejpřesnější odhad zní 4,33. Taková čísla vůbec nedávala smysl, dokud nebyl odhalen význam gradientu, sloužícího jako prostředník. Gradient se konečkonců skládá z nespočtu jednotlivých gradací: nelze jej rozčlenit do celých čísel. A velkou výhodou gradientu je, že ojedinělá reakce se může opakovat znovu a znovu, jen aby vytvořila jedinou molekulu ATP. Pokud se při jediné samostatné reakci uvolní setina energie, potřebné ke tvorbě jednoho ATP, pak se reakce bude jednoduše opakovat stokrát a gradient se krok za krokem zvětšuje, dokud není zásoba protonů dost velká k vyprodukování jednoho ATP. Najednou může buňka střádat; má kapsu plnou drobných.

Co to znamená? Vraťme se k reakci vodíku s oxidem uhličitým. Bakterii pořád ještě stojí jeden ATP, aby se proces rozběhl; ale teď už může vytvořit více než jeden ATP, protože si může naspořit na další. Možná to není nejvýnosnější živnost, ale určitě je poctivá. Co je ale důležitější, je to rozdíl mezi schopností růstu a neschopností růstu. Jestli mají Martin s Russellem pravdu a díky této reakci vyrostly ty nejranější formy života, pak jediným způsobem, jakým mohl život kdy hlubokomořské průduchy opustit, byla chemiosmóza. Je bezesporu pravda, že jediné formy života, které z této reakce dnes těží, jsou jednak na chemiosmóze závislé a jednak bez ní nemohou růst. Stejně tak je pravda, že takřka všechen život na Zemi tento prazvláštní mechanismus sdílí, dokonce i tam, kde to není nezbytné. Proč? Řekl bych, že jednoduše proto, že jde o dědictví po společném předkovi, který bez něj nemohl žít.

Ale ještě je tu ten hlavní důvod, díky němuž lze usuzovat, že Martin a Russell mají pravdu – využití protonů. Proč například ne na-

bitých atomů sodíku, draslíku nebo vápníku, které používají naše vlastní nervové soustavy? Neexistuje žádný zřejmý důvod, z jakého by měly protony dostat přednost před gradientem jakéhokoli jiného druhu elektricky nabitých částic; a jsou i bakterie, jež využívají spíše sodíkových gradientů než protonových, i když jen zřídka. Ten hlavní důvod nás, podle mého názoru, vrací zpět k vlastnostem Russellových průduchů. Připomeňme si, že skrze průduchy se zásadité tekutiny dostávají do oceánu, který je kvůli rozptýlenému oxidu uhličitému kyselý. Kyseliny jsou definovány s pomocí protonů: kyselina je na protony bohatá, zatímco zásada jich má málo. A tak zásadité tekutiny, probublávající do kyselých oceánů, vytvářejí přírodní protonový gradient. Jinými slovy, minerální komůrky v Russellových zásaditých průduších jsou přírodně chemiosmotické. Sám Russell na tuto skutečnost upozornil už před mnoha lety, ale zjištění, že bakterie nemohou bez chemiosmózy průduchy opustit, bylo jedním z přínosů jeho spolupráce s Martinem, zabývajícím se energetikou mikrobů. A tak tyto elektrochemické reaktory nejenže vytvářejí organické molekuly a ATP, ale rovnou přišly i s únikovým plánem, se způsobem, kterým se lze vyhnout obecnému problému placení desetilibrovou bankovkou.

Samozřejmě, přírodní protonový gradient je k něčemu dobrý jen tehdy, pokud z něj může život těžit a později i stvořit svůj vlastní gradient. Je sice jistě jednodušší využívat již existujícího gradientu než z ničeho tvořit něco, ale ani jeden z těchto procesů neprobíhá přímo. Není pochyb o tom, že se tyto mechanismy vyvinuly prostřednictvím přirozeného výběru. Dnes jsou potřeba četné bílkoviny specifikované geny a není důvod se domnívat, že by se tak složitý systém bez bílkovin a genů vůbec mohl vyvinout – bez genů složených z DNA. A tak před sebou máme pozoruhodnou smyčku. Život nemohl opustit prostředí průduchů, dokud se nenaučil, jak využít svůj chemiosmotický gradient, ale svůj gradient mohl využít jen s pomocí genů a DNA. Zdá se, že ze smyčky není úniku: život se ve své kamenné kolébce musel vyvíjet překvapivě sofistikovaně.

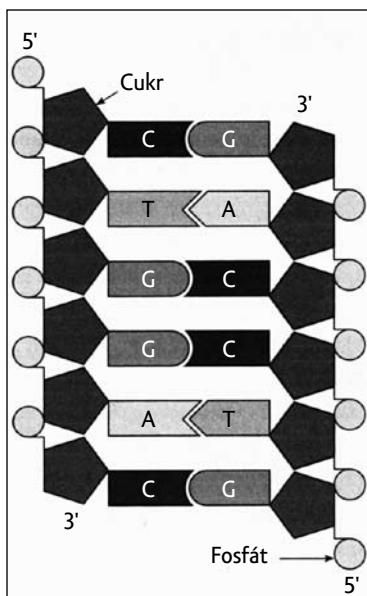
Tak nám vzniká neobyčejný obraz Posledního univerzálního společného předka všeho života na Zemi. Mají-li Martin s Russellem pravdu – a já myslím, že mají – pak nešlo o žádnou volně žijící buňku, ale o kamenný labyrint minerálních komůrek s katalytickými zdmi ze železa, niklu a síry, jemuž dodávaly energii přírodní protonové gradienty. První formou života byl porézní kámen, který vytvářel složité molekuly a uvolňoval energii, dokud nevznikly bílkoviny a sama DNA. A to znamená, že jsme si v této kapitole odvyprávěli jen polovinu celého příběhu. V další kapitole se dostaneme k té druhé polovině – ke vzniku té nejslavnější ze všech molekul, k materiálu, z něhož se skládají geny, k DNA.

Kapitola 2: DNA

Kód života

V hospodě U Orla v Cambridge visí modrá pamětní deska, pověšená v roce 2003 u příležitosti padesátého výročí neobvyklé události, která obohatila tehdejší hospodskou konverzaci. 28. února 1953 vpadla v době oběda dovnitř dvojice štamgastů, kteří prohlásili, že odhalili tajemství života. Přestože horlivý Američan a upovídaný Brit s protivným smíchem občas museli vypadat spíše jako komické duo, tentokrát to mysleli vážně – a měli napůl pravdu. Dá-li se říct, že život skutečně má nějaké tajemství, určitě je to DNA. Ale Crick a Watson i přes všechnu svou inteligenci znali jen polovinu onoho tajemství.

To ráno Crick s Watsonem zjistili, že DNA je dvojšroubovice. Jejich objev byl nápaditou směsicí použitého důvtipu, modelování, chemických dedukcí a několika zcizených rentgenových difrakčních snímků a jak řekl Watson, výsledek vypadal „tak pěkně, že to zkrátka musela být pravda“. A čím víc se o tom onoho poledne bavili, tím si byli jistější. Své řešení publikovali 25. dubna v časopise *Nature* jako jednostránkový dopis, podobný porodním oznámením, která vycházela v místních novinách. Jejich nezvykle skromně laděný příspěvek (Watson jednou pronesl slavný výrok o tom, že Cricka ještě nikdy ve skromné náladě nezastihl a sám že na tom nebyl o moc lépe) končil nanejvýš zdrženlivým prohlášením: „Neuniklo naší pozornosti, že specifické párování, které jsme popsali, se nabízí jako případný kopírovací mechanismus genetického materiálu.“



Obrázek 2.1 Páry bází v DNA. Z grafického provedení lze vyčíst, že G se váže pouze na C a A se váže jen na T.

Z DNA se samozřejmě skládají geny, jde o dědičný materiál. Má kód pro lidskou bytost i měňavku, pro houbu i pro bakterii, pro vše na Zemi kromě pár virů. Jeho dvojšroubovice, ve které se obě spirály navzájem do nekonečna obtáčejí, je pro vědce modlou. Watson a Crick ukázali, jak se na molekulární úrovni vzájemně doplňují. Odtrhněte je od sebe a zjistíte, že každá z nich podle své šablony tvaruje tu druhou, čímž místo původní jedné dvojšroubovice vznikají dvě nové, totožné. Pokaždé, když se organismus rozmnoží, předá potomstvu kopii své DNA. Jediné, co musí udělat, je roztrhnout šroubovice od sebe a vytvořit tak dvě identické kopie originálu.

Zatímco podrobnější fungování molekulární mechaniky je dost náročné na pochopení, samotný princip je tak nádherně prostý, až to bere dech. Genetický kód je vlastně sledem písmen (přesněji „bází“). Abeceda DNA má pouhých čtyři písmena – A, T, G a C. Ta zastupují adenin, thymin, guanin a cytosin, ale s těmito chemickými názvy si nemu-

síme dělat starosti. Hlavní je, že s omezením daným tvarem a vazební strukturou se A vždy páruje jen s T a C s G (viz Obrázek 2.1). Odtrhněte vlákna od sebe a každé se bude hemžit nespárovanými písmeny. Na každé obnažené A se může navázat pouze T; na každé C písmeno G a tak dál. Nejenže se tyto páry bází doplňují, ony se na sebe přímo touží vázat. Nudu jednotvárného chemického života písmena T může rozehnat jediné, a to blízkost písmena A. Dejte je k sobě a v okamžiku překrásné harmonie dojde k vazbě. Tak vypadá pravá chemie: jde o učebnicovou ukázkou „základní přitažlivosti“. DNA tedy není jen jakousi pasivní šablonou; každé vlákno je jako magnet přitahováno ke svému protějšku. Odtrhněte vlákna od sebe a ony zase spontánně splynou, nebo pokud je udržíte odděleně, budou jako samostatné šablony nesmírně toužící po dokonalém partnerovi.

Sled písmen v DNA se zdá být nekonečný. V lidském genomu jsou například téměř 3 miliardy písmen (párů bází) – v odborné hantýrce tedy 3 gigabáze. To znamená, že jediný set chromozómů v jádru buňky v sobě nese seznam 3 000 000 000 jednotlivých písmen. Kdyby měla být písmena lidského genomu vytištěna, zaplnila by asi 200 svazků, z nichž každý by byl velký jako telefonní seznam. A lidský genom zdaleka není ze všech největší. Rekord poněkud překvapivě drží nepatrná měňavka, Amoeba dubia, s obrovským genomem o rozsahu 670 gigabází, tedy zhruba 220krát větším, než je náš vlastní. Většina toho je zřejmě jen jakési „harampádí“, zbytečné kódy bez skutečného významu.

Kdykoli se buňka rozdělí, zreplikuje veškerou svou DNA v procesu, který trvá jen několik hodin. Lidské tělo je monstrozita složená z patnácti bilionů buněk, z nichž v sobě každá nese svou věrnou kopii té samé DNA (přesněji řečeno dvě kopie). Aby se vaše tělo z jediné buňky vajíčka zformovalo, musela se vaše šroubovice DNA rozdělit 15 bilionkrát (a vlastně ještě mnohem vícekrát, protože buňky celou dobu umírají a musí být nahrazovány). Každé písmeno se s bezmála zázračnou přesností kopíruje a znovuvytváří přesnou podobu originálu, přičemž k chybě dochází jen zhruba u jednoho písmena

z miliardy. Kdyby měl pro srovnání podobné přesnosti dosáhnout písař, musel by s maximálně jednou chybou 280krát přepsat Bibli. Ve skutečnosti se písařům samozřejmě zdaleka tolik nedaří. Údajně se dochovalo 24 000 rukopisů Nového zákona a žádné dvě kopie nejsou zcela identické.

Dokonce i v DNA ale mohou přibývat chyby, už jen proto, že genom je tak rozsáhlý. Takové chyby se nazývají „bodové mutace“, kde je jedno písmeno omylem nahrazeno jiným. Kdykoli se lidská buňka rozdělí, dá se očekávat výskyt asi tří mutací v každém setu chromozómů. A kdykoli se lidská buňka rozdělí, pak takových mutací přibude, což nakonec nevyhnutelně vede k chorobám, jako je rakovina. Mutace také přecházejí z generace na generaci. Pokud se oplodněné vajíčko vyvíjí jako ženské embryo, je k vytvoření nové buňky vajíčka potřeba asi třiceti opakování buněčného dělení; a počet mutací se při každém z nich zvyšuje. U mužů je to ještě horší: k vytvoření spermie je potřeba sto opakování buněčného dělení a množství mutací při nich neúprosně roste. Protože k tvorbě spermií dochází po celý život a jedno kolo buněčného dělení střídá druhé, s přibývajícím věkem je to u mužů čím dál tím horší. Jak to podal genetik James Crow, tím největším zdravotním rizikem pro populaci jsou z hlediska mutací plodní staří muži. Ale dokonce i průměrné dítě mladých rodičů má ve srovnání se svými rodiči kolem 200 nových mutací (ačkoli jen hrstka jich může být přímo nebezpečná).¹

A tak i přes pozoruhodnou přesnost, se kterou se DNA kopíruje, dochází ke změnám. Každá generace se liší od té předcházející – nejen proto, že naše geny promíchává sex, ale také proto, že všichni nesou nové mutace. Mnoho z nich jsou „bodové“ mutace, o kterých jsme se už zmínili, tedy změny jediného písmena DNA, ale některé jsou zásadnější. Dochází ke zdvojení nebo k nerozdělení celých chromozómů; vymazání nesmírně rozsáhlých úseků DNA; viry vkládají nové sekce; části chromozómů se převrací a obrací přitom posloupnost písmen. Možností je nekonečně mnoho, i když ty nejrazantnější změny jsou jen vzácně sluchitelné se životem. Z pohledu z tohoto úhlu

se genom jako jáma plná hadů hemží neustálou aktivitou a hadům podobné, věčně neposedné chromozómy se v něm slučují a rozdělují. Přírozený výběr umí naprostou většinu těchto monster zlikvidovat a působí tak vlastně jako stabilizátor. DNA se přetváří a proměňuje, přírozený výběr změny vyrovnává. Veškeré pozitivní změny jsou zachovávány, zatímco ty závažnější chyby nebo změny jsou doslova utráceny. Další, méně vážné mutace mohou být v pozdějším životě příčinou onemocnění.

Proměnlivý sled písmen v DNA je cosi mnohem ohromnějšího, než by se ze skoro všech prací o našich genech mohlo zdát. Například takové testy DNA – používané k určování otcovství, diskreditaci prezidentů nebo k usvědčování podezřelých desítky let poté, co spáchali zločin – jsou založené na hledání rozdílů v písmenné sekvenci mezi jednotlivci. Protože je v DNA tolik rozdílností, každý z nás má svůj unikátní DNA „otisk“. Podobně se i naše náchylnost k mnoha chorobám odvíjí od nepatrných odlišností v sekvenci DNA. Lidé se od sebe v průměru liší přibližně vždy v jednom písmenu z 1000, takže v lidském genomu je mezi 6 a 10 miliony jednotlivých odlišných písmen, známých jako „snipy“ (což je zkratka pro „single nucleotide polymorphisms“ neboli „jednonukleotidové polymorfismy“). Existence snipů znamená, že v sobě všichni neseme mírně se lišící verze většiny genů. Zatímco mnoho snipů je téměř určitě nepodstatných, další se dle statistik pojí s nemocemi, jako jsou cukrovka nebo Alzheimerova choroba, i když jak konkrétně je způsobují je často nejasné.

Nehledě na uvedené odlišnosti lze stále ještě hovořit o „lidském genomu“; i přes přítomnost snipů je v nás 999 písmen z 1000 identických. Má to dvě příčiny: čas a přírozený výběr. Z evolučního hlediska ještě od doby, kdy jsme všichni byli jen lidoopi, mnoho času neuplynulo; ostatně lecjaký zoolog by mě patrně ujistil, že jimi stále ještě jsme. Za předpokladu, že se lidé od předka společného se šimpanzi odštěpili před zhruba 6 miliony let a od té doby hromadili 200 mutací za generaci, jsme měli čas na přeměnu pouhého 1 % svého genomu. Vzhledem k tomu, že šimpanzi se vyvíjeli podobným tempem, by-

chom mezi námi a jimi očekávali rozdíl 2 %. Ve skutečnosti je rozdíl o trochu menší; co se týče sekvence DNA, jsou šimpanzi a lidé asi z 98,6 % identičtí.² To je způsobeno přirozeným výběrem, jenž většinu škodlivých změn eliminuje a proces tak brzdí. Jsou-li tyto změny přirozeným výběrem vyřazovány, pak si přeživší sekvence musí být navzájem podobnější, než kdyby změny probíhaly bez omezení; znovu se dostáváme k vyrovnávacímu efektu přirozeného výběru.

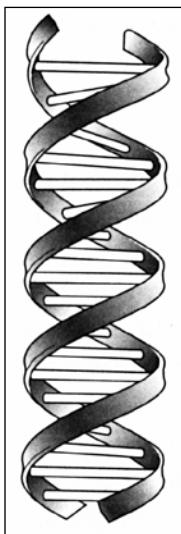
O něco dále proti proudu času spolu oba prvky, čas i přirozený výběr, utkaly jednu z nejúžasnějších a nejrafinovanějších tapisérií vůbec. Veškerý život na naší planetě je spřízněný a údaje psané písmeny DNA onu spřízněnost přesně vysvětlují. Srovnáním sekvencí DNA můžeme statisticky vypočítat, jak blízce příbuzní jsme k čemukoli jinému, od lidoopů k vačnatcům, plazům, obojživelníkům, rybám, hmyzu, koryšům, červům, rostlinám, prvokům i bakteriím – stačí si vybrat. Všichni jsme díky své přesně srovnatelné sekvenci písmen specifičtí. Dokonce i některé úseky sekvencí, zachované společným přirozeným výběrem, sdílíme, zatímco jiné jejich části se změnilly k nepoznání. Přečtete si králíčí DNA sekvenci a naleznete v ní nekonečný sled bází s některými sekvencemi stejnými, jako jsou naše, i s odlišnými, které se divoce mísí a prolínají jako kaleidoskopický obraz. Stejně je to i s bodlákem: sekvence je v některých částech identická nebo alespoň podobná, ale teď už se liší v delších úsecích, čímž odráží předlouhou dobu uplynulou od chvíle, kdy jsme byli naším společným předkem, a naprosto odlišné způsoby života, jež vedeme. Ale naše nižší biochemie je pořád stejná. Všichni jsme postaveni z buněk, které fungují velice podobně a které jsou stále ještě specifikovány podobnými sekvencemi DNA.

Vzhledem k těmto společným biochemickým vlastnostem bychom čekali, že narazíme na podobné sekvence i u těch nejvzdáleněji příbuzných forem života, jako jsou bakterie, a také že ano. Ale ve skutečnosti je zde prostor pro nejasnosti, protože podobnost sekvencí se neměří na škále mezi 0 a 100 %, jak by možná někdo čekal, ale mezi 25 a 100 %. To odráží skutečnost, že v DNA jsou čtyři písmena. Platí,

že je-li náhodně zvolená část DNA od základu uměle vytvořena v laboratoři, pak je 25 % podobnosti sekvence předáno náhodně zvolenému z genů – pravděpodobnost, že se každé písmeno bude shodovat s písmenem lidské DNA, je čtvrtinová. Proto lze říct, že myšlenka, že jsme „napůl banány“, jelikož se sekvence našeho genomu z 50 % shoduje s DNA banánu, je mírně řečeno zavádějící. Se stejnou logikou bychom mohli usuzovat, že každý náhodně vytvořený úsek DNA bude ze čtvrtiny lidský. Dokud nezjistíme, co písmena doopravdy znamenají, budeme tápat v naprosté tmě.

A to je příčinou skutečnosti, že Watson a Crick toho rána roku 1953 poznali z tajemství života jen polovinu. Znali strukturu DNA a chápali, jak to, že každé vlákno dvojšroubovice může sloužit jako šablona pro to druhé a tak tvořit dědičný kód každého organismu. Ve svém slavném díle nezminili, co ten kód písmenné sekvence vlastně vyjadřuje, a trvalo jim dalších deset let pečlivého bádání, než na to přišli. Rozluštění kódu života sice nemělo takový symbolický význam, jako tomu bylo u dvojšroubovice, která písmena na vlákně sama o sobě nijak neovlivňovala, ale přesto bylo značným úspěchem, za nímž stál především sám Crick. Pro tuto kapitolu je rozluštěný kód, původně jedno z nejzáhadnějších zklamání v moderní biologii, významný především tím, že skýtá zajímavou možnost nahlédnout do počátku vývoje DNA před bezmála 4 miliardami let.

DNA se zdá být tak moderní, že není snadné si uvědomit, jak málo se toho v roce 1953 vědělo o základech molekulární biologie. DNA se odpoutala od původní práce Watsona a Cricka a Crickova umělecky nadaná manželka Odile ji zobrazila jako onen známý pokroucený žebřík, kopírovaný víceméně beze změny ještě půl století (viz Obrázek 2.2). A Watsonova slavná kniha *The Double Helix* napsaná v 60. letech přišla s moderním, vědeckým náhledem. Byla tak působivá, že život díky ní začal připomínat umění. Já například Watsonovu knihu četl ve škole a přitom jsem snil o Nobelových cenách a originálních objevech. S odstupem můžu říct, že mé představy o povaze



Obrázek 2.2 Nákres dvojšroubovice DNA, z něhož je patrné, jak se kolem sebe jednotlivé šroubovice navzájem obtáčejí. Po rozdělení vláken může každá fungovat jako šablona pro nové vlákno, které by ji doplnilo.

vědecké práce se prakticky výhradně zakládaly na Watsonově knize; a nevyhnutelné rozčarování, které mne potkalo na univerzitě, mohlo pramenit z neschopnosti reality poskytnout mi takové vzrušení, jaké jsem původně očekával. Abych si to vynahradil, začal jsem místo toho s horolezectvím. Ještě pár let trvalo, než se mě znovu zmocnilo intelektuální vzrušení spojené s vědou.

Ale skoro nic z toho, co jsem se vlastně na univerzitě naučil, Watson s Crickem v roce 1953 neznali. Dnes už je běžně přijímáno, že „geny kódují bílkoviny“, ale na začátku 50. let ani ohledně toho nepanovala kdovíjaká shoda. Brzy poté, co Watson v roce 1951 přišel na Cambridge, ho otevřený skepticismus Maxe Perutze a Johna Kendrewa začal rozčilovat. Nepřišlo jim ještě dostatečně prokázané, že se geny skládají z DNA a nikoli z bílkovin. Zatímco molekulární struktura DNA byla dosud neznámá, její chemické složení bylo více než zřejmé a mezi různými živočišnými druhy se téměř nelišilo. Pokud mělo platit, že geny byly základem dědičnosti a byl v nich zakódován nespočet rozdílů mezi druhy i jednotlivci, jak mohlo něco tak jed-

notvárného a neměnného ve složení u zvířat, rostlin i bakterií vysvětlovat rozmanitost a bohatost života? Bílkoviny se ve své nekonečné rozmanitosti zdály pro tak nesmírný účel mnohem vhodnější.

Sám Watson patřil mezi několik biologů, přesvědčených pilnými experimenty amerického biochemika Oswalda Averyho. Ty byly zveřejněny roku 1944 a poukazovaly na to, že se geny skládají z DNA. Jen Watsonův zápal a přesvědčení přiměly Cricka pustit se do úkolu, jenž se nabízel – vyřešit otázku struktury DNA. Jakmile se to podařilo, stalo se rozluštění kódu mnohem naléhavějším. Znovu je třeba říct, že pro moderní generaci je tehdejší neznalost až překvapující. DNA je nekonečný sled pouhých čtyř různých, zdánlivě náhodně seřazených písmen. V zásadě nebylo obtížné si odvodit, že jejich pořadí může nějakým způsobem kódovat bílkoviny. I bílkoviny se skládají ze sledu stavebních prvků zvaných aminokyseliny. Podle všeho sekvence písmen DNA kódovala sekvenci aminokyselin v bílkovinách. Ale jestli byl použitý kód univerzální, jak se jevil, pak musel být univerzální i výčet aminokyselin. O tom ale v žádném případě nepanovala shoda. Sotva se o tom vůbec uvažovalo, dokud si Watson s Crickem nesedli U Orla a nad obědem nesepsali kanonický „seznam dvacetí“, který je dnes v každé učebnici. Je pozoruhodné, že se jim to podařilo hned na první pokus, a to i přesto, že ani jeden z nich nebyl biochemik.

Objevila se nová výzva a rychle se z ní stala hra čísel, neomezovaná žádnými poznatky o molekulách, memorovanými pozdějšími generacemi. Čtyři různá písmena v DNA se musela kódovat pro 20 aminokyselin. Tím se vyloučila možnost přímého přepisu – jedno písmeno v DNA na jednu aminokyselinu nestačilo. Stejně tak byl vyloučen dvouciferný kód, neboť by z něj nemohlo vycházet více než 16 aminokyselin (4×4). Byla potřeba nejméně tři písmena: tripletový kód (což později potvrdili Crick a Sydney Brenner), ve kterém vždy trojice písmen DNA kódovala jednu aminokyselinu. Ale tak by zřejmě docházelo ke značnému plýtvání. Čtyři písmena mohla vytvářet 64 trojmístných kombinací ($4 \times 4 \times 4$) a tak kódovat 64 různých

aminokyselin. Proč tedy jen 20? Zázračná odpověď musela vysvětlit, jak a proč abeceda o čtyřech písmenech, seskupených po trojicích do 64 slov, kóduje 20 aminokyselin.

Je asi příhodné, že tím prvním, kdo s nějakou odpovědí přišel, nebyl biolog. Byl to temperamentní americký fyzik ruského původu George Gamow, známější pro své teorie o Velkém třesku. Pro Gamowa byla DNA doslova šablonou pro bílkoviny: aminokyseliny se vtiskávaly do kosočtvercových mezer mezi záhyby šroubovice. Ovšem Gamowova teorie byla v podstatě numerologická a zjištění, že bílkoviny se v jádru buňky vůbec netvoří a tedy se nikdy nemohou dostat do přímého kontaktu s DNA, jej poněkud vyvedlo z míry. Jeho teorie se pak jednoduše přesunula do abstraktnější roviny. V zásadě navrhl možnost překrývajícího se kódu, který má tu významnou, kryptografy ceněnou výhodu, že umožňuje maximální zhuštění informací. Představte si sekvenci písmen ATCGTC. První „slovo“ – nebo odborněji „kodon“ – by bylo ATC, druhé TCG, třetí CGT a tak dále. Velmi důležité je, že překrývající se kódy vždy určují možnou sekvenci aminokyselin. Jestli je ATC kódem pro určitou konkrétní aminokyselinu, pak ji musí následovat aminokyselina, jejíž kodon začíná na TC; a ta další musí začínat písmenem C. Při laboratorním procházení všech permutací je velká část trojic jednoduše vyřazena – nemohou být částí takového překrývajícího se kódu, protože A musí vždy sousedit s T, T s C a tak dále. Kolik trojic tak zbývá na kódování aminokyselin? Přesně 20!, prohlásil Gamow, jako by tahal králíka z klobouku.

Byla to první z mnoha chytrých myšlenek, které měly podlehnout útoku nemilosrdných dat. Překrývající se kódy doplácí na svá vlastní omezení. Ta zaprvé říkají, že určité aminokyseliny se v bílkovinách mohou vyskytovat jen vedle sebe, ale tou dobou se Fred Sanger – tichý génius, který získal jednu Nobelovu cenu za sekvencování bílkovin a druhou za sekvencování DNA – zabýval sekvencováním inzulinu. Brzy se ukázalo, že jakákoli aminokyselina může sousedit s jakoukoli jinou: sekvence bílkovin tedy ve skutečnosti nijak omezená není. Druhý velký problém byla skutečnost, že jakákoli bodová mutace (při

kteřé dochází k záměně jednoho písmena za jiné) by musela v překrývajícím se kódu ovlivnit více než jednu aminokyselinu, ale výsledky experimentů ukázaly, že ke změně dochází jen u jediné. Kód se tedy ve skutečnosti očividně nepřekrýval. Gamowova myšlenka překrývajících se kódů tak byla vyvrácena už dlouho před tím, než bylo zjištěno, jak vypadají doopravdy. Kryptografové si už začínali myslet, že matka Příroda něco opomněla.

Další na řadě byl sám Crick. Ten přišel s myšlenkou tak líbeznou, že ji všichni ihned přijali, a to i přesto, že jemu samotnému dělal starosti nedostatek dat, o něž by svou teorii opřel. Crick využil nových poznatků, pocházejících od několika laboratoří zabývajících se molekulární biologii, mezi nimi především od Watsonovy nové laboratoře na Harvardu. Watsona se zmocnila posedlost RNA, kratší verze DNA s jediným vláknem, která se nachází jak v jádru buňky, tak v cytoplazmě. A nejen to, napadlo Watsona, RNA je také nezbytnou součástí miniaturních strojů, dnes nazývaných ribozomy, které se zdály být zodpovědné za syntézu bílkovin. A tak DNA, netečná a nehybná, sedí v jádru buňky. Kdykoli je potřeba bílkovina, je část DNA využita jako šablona, podle které se vytvoří RNA kopie, a ta poté fyzicky opustí jádro buňky a zamíří k ribozomům, čekajícím venku. Tomuto rychlému kurýrovi se říká mediátorová RNA, resp. mRNA. Tak dochází k tomu, že, jak napsal Watson Crickovi už v roce 1952, „DNA vytváří RNA a ta vytváří bílkovinu“. Cricka zaujala následující otázka: jak je přesná písmenná sekvence v poselské RNA převáděna do sekvence aminokyselin v bílkovině?

Crick se nad tím zamyslel a posléze vyslovil domněnku, že by zpráva RNA mohla být překládána s pomocí několika různých „adaptérových molekul“, jedné pro každou aminokyselinu. I ty by musely být vytvořené z RNA a každá z nich by disponovala „anti-kodonem“, který by dovedl rozpoznat kodon v mediátorové RNA a navázat se na něj. V principu, pravil Crick, je to úplně stejné jako u DNA: C tvoří dvojici s G, A s T a tak dále.³ Existence takových molekulárních adaptérů byla v té době stále ještě ryze hypotetická, ale během pár dalších let

byly náležitě objeveny – a skládaly se z RNA, jak to předpověděl Crick. Dnes se jim říká transferová RNA neboli tRNA. Celá konstrukce začínala připomínat stavebnici Lego, jejíž dílky se spojují a zase rozpojují a vytvářejí sice prchavá, ale zato úchvatná díla.

V tomto bodě se Crick spletl. Takto obšírně to vysvětluji proto, že přestože je skutečnost o něco bizarnější, než se Crick domníval, jeho teorie stále ještě usnadňuje pátrání po tom, jak to vlastně všechno začalo. Crick přirovnával mediátorovu RNA v cytoplazmě k prasnici ve chlévě – stejně jako jsou cecíky prasnice připraveny k tomu, aby se k nim přisála selátka, jsou kodony mediátorové RNA připraveny navázat na sebe transferovou RNA. Nakonec se všechny tRNA spokojeně usadí jedna vedle druhé po celé délce mediátorové RNA a chrlí kolem sebe aminokyseliny, jako když selata pokojně vrtí ocásky. Jsou připravené k proměně v bílkovinu.

Crickův problém spočíval v tom, že tRNA se objevovaly náhodně a napojovaly se na nejbližší volný kodon. Ale jestli nezačínaly na začátku a nekončily na konci, jak mohly poznat, kde jeden kodon začíná a druhý končí? Jak mohly najít správný čtecí rámec? Pokud vypadá sekvence stejně jako v předchozím případě, tedy ATCGTC, jedna tRNA by se mohla napojit na ATC a druhá na GTC; ale co brání tRNA, aby si uprostřed sekvence vyhlédla CGT a napojila se na něj, což by celou zprávu popletlo? Crickovým rozhodným řešením bylo celé to zakázat. Má-li zpráva jako celek vyznívat jednoznačně, nemohou platit všechny kodony. Ale které vyřadit? Sekvence složené jen z písmene A, C, U nebo G byly rovnou odepsány; v řadě AAAAAA by nešlo najít správný čtecí rámec. Crick pak prošel všechny možné písmenné kombinace. Stručně řečeno, kdyby připadalo v úvahu ATC, pak by všechny cyklické permutace těchto tří písmen musely být vyřazeny (takže je-li přípustné ATC, blokují se TCA a CAT). Kolik možností pak zbude? Znovu přesně 20! (Ze 64 možných kodonů jsou předem vypuštěny AAA, UUU, CCC a GGG, což jich ponechává 60; a je-li přípustná jen jedna cyklická permutace ze 3, pak se 60 dělí 3 a výsledkem je 20.)

Na rozdíl od případu překrývajících se kódů Crickův kód nijak neomezoval varianty pořadí aminokyselin v bílkovině, ani neznamenal, že bodová mutace nevyhnutelně ovlivní dvě až tři aminokyseliny. Když byla tato myšlenka představena, krásně vyřešila problém čtecího rámce zredukováním 64 kodonů na 20 aminokyselin, a to matematicky uspokojivě – a byla zcela v souladu s veškerými známými daty. Ale i přesto byla chybná. Během několika málo let se ukázalo, že syntetická RNA složená výhradně z AAA (tuto možnost Crick zapověděl) se přese všechno kóduje pro aminokyselinu lyzin a že se může přeměnit na bílkovinný polymer, složený výhradně z lyzinu.

Jak měli experimentátoři postupem času k dispozici čím dál pokročilejší vybavení, dalo postupně několik skupin výzkumníků v polovině 60. let dohromady skutečný kód. Po vytrvalých kryptografických snahách o prolomení kódu se dostavilo zklamání, neboť skutečnost je očividně chaotická. Matematicky elegantní řešení se ani zdaleka nekonalo, kód je jednoduše degenerovaný (což jinak řečeno znamená: plný nadbytečnosti). Trojice aminokyselin je zakódovaná celkem šesticí rozdílných kodonů, ostatní jen jedním nebo dvěma. Všechny kodony mají i své uplatnění, kdy tři říkají „zastav se u nás“, zatímco všechny ostatní se kódují na aminokyseliny. Zdálo se, že chybí jak krása, tak pořádek; byla to skutečně dokonalá zbraň proti myšlence, že právě krása je klíčem k vědeckému poznání.⁴ Dokonce se ani nezdálo, že by panoval nějaký zvláštní konstrukční řád, který by fungování kódu objasňoval – mezi aminokyselinami a jednotlivými kodony neexistovala žádná silnější chemická či fyzická spojení.

Crick onu neuspokojivou podobu kódu nazval „zamrzlou pohromou“ a většina ostatních mu mohla jen dát za pravdu. Byla zamrzlá, jak prohlásil, protože jakékoli její narušení – rozmrazení kódu – by mělo závažné následky. Jedna bodová mutace změni tu či onu aminokyselinu, ale jakákoli změna v samotném kódu by znamenala katastrofální změny úplně ve všem. Je to jako rozdíl mezi občasným překlepem v knize, který na významu nic moc nemění, a proměnou

celé abecedy na nesrozumitelné klikyháky. Jakmile by se to potvrdilo, pokračoval Crick, byla by veškerá další manipulace s kódem jistě zakázána pod trestem smrti; a tento názor je mezi biology značně rozšířený i dnes.

Ale to, že kód měl charakter „pohromy“, představovalo pro Cricka další problém. Proč jen jedna pohroma, proč ne hned několik? Je-li povaha kódu libovolná, neplynul by z žádného kódu relativně větší užitek než z jakéhokoli jiného. Nebyl by žádný důvod pro existenci „selektivního bodu“, v němž by jedna z verzí kódu měla, jak řekl Crick, „takovou selektivní výhodu nad všemi svými konkurenty, že se jí jako jediné podařilo přežít“. Jestli ale žádný takový bod neexistoval, přemýšlel dál Crick, proč v různých organismech neexistovalo několik různých kódů?

Nabízí se odpověď, že všechny organismy na Zemi mají společného předka, jehož kód už byl daný. Filozofičtěji řečeno, život na Zemi vznikl jen jednou jedinkrát, což této události dodalo nádech jedinečnosti, nepravděpodobnosti a snad až bizarnosti. Pro Cricka z toho vyplývalo, že došlo k zavlečení – k jakémusi jednorázovému naočkování. Život, uvažoval, byl na Zemi „zaset“ jako bakteriální klon, pocházející z jediného mimozemského organismu. Šel ještě dál a vyslovil domněnku, že bakterie úmyslně „vysela“ z hvězdné lodi vyslané k Zemi jakási mimozemská inteligence – tuto myšlenku nazval „řízená panspermie“. Téma dále rozvinul v knize *Life Itself* neboli *Sám život*, která vyšla v roce 1981. Jak se ve vynikajícím Crickově životopise vyslovil Matt Ridley: „Obsah toho díla mnohé udivil. Sám velký Crick píše o mimozemských formách života, které z hvězdné lodi osévají vesmír? Popletly mu snad úspěchy hlavu?“

Zda ona kódová pohroma ospravedlňuje tak mimořádný postoj, to už je věc názoru. Samotný kód nepotřeboval žádné zvláštní výhody či nevýhody, aby prošel selektivním bodem: výběr výrazně zvýhodňující jakýkoli specifický rys nebo dokonce i tak nepravděpodobná nehoda jako dopad asteroidu mohly vyhladit všechny klony až na jeden, který by logicky měl jen jeden kód. Ať to bylo jakkoli, Crickovi se nepovedlo

načasování. Od začátku 80. let, tedy od doby, kdy Crick psal, jsme stačili zjistit, že kód života není ani zamrzlý, ani nejde o žádnou pohromu. V kódu existuje skrytý systém, „kód v kodonech“, jenž o svém 4 miliardy let starém původu leccos vypovídá. A dnes už víme, že kód zdaleka není žádnou zavrženíhodnou, kryptografy odsuzovanou šifrou, ale jedním vyvoleným kódem z milionu, schopným odolávat změnám a současně i popohánět proces evoluce.

Kód v kodonech! V kódu ze 60. let byly odhaleny různé pravidelnosti, ale většinou je šlo opomíjet s tím, že jde sotva o víc než o jakousi kuriozitu, statistickou chybu, jak to ostatně dělal i sám Crick. Dokonce i když se přihlédlo ke všem najednou, nezdálo se, že by jejich uspořádání dávalo smysl. Proč tomu tak bylo, to je dobrá otázka, kterou zodpověděl kalifornský biochemik Brian K. Davis, jenž se o původ genetického kódu dlouhodobě zajímá. Davis poznamenává, že zájem o původ kódu rozptýlila samotná idea „zamrzlé pohromy“: proč by kdo měl zkoumat pohromu? Pohromy se prostě stávají. Kromě toho podle Davise ještě onu hrstku výzkumníků, jejichž zájem přesto neopadl, svedla špatným směrem převládající myšlenka prvotní polévky. Kdyby kód vzešel z polévky, pak by měl mít původ v molekulách, k jejichž vzniku by ve fyzikálních i chemických procesech v polévce docházelo nejpravděpodobněji. A to by znamenalo, že základ kódu tvořilo pevné jádro aminokyselin a že ty další se přidaly až později. Tato teorie byla právě tak pravdivá, aby její důkazy byly sice matoucí, ale přesto trýznivě nadějně. Jen pokud pojmem kód jako produkt biosyntézy – tedy produkt buněk, schopných tvorby vlastního stavebního materiálu z vodíku a oxidu uhličitého – začnou všechny pravidelné vzorce dávat smysl.

A co že ty nepolapitelné vzorce vlastně jsou? Ke každému písmenu tripletového kódu se pojí odlišný pravidelný vzorec. Ten u prvního písmena je nejvýznamnější, neboť souvisí s procesem, kterým se jednoduchý prekurzor přemění na aminokyselinu. Jeho podstata je natolik překvapivá, že si zaslouží alespoň stručnou zmínku. V dneš-

ních buňkách se aminokyseliny vytvářejí sérií biochemických kroků, které začínají u několika různých jednoduchých prekurzorů. Překvapivé je to, že mezi prvním písmenem třípísmenného kodonu a těmito jednoduchými prekurzory existuje spojení. Všechny aminokyseliny vytvořené z prekurzoru zvaného pyruvát tak sdílejí stejné první písmeno v kodonu – v tomto případě písmeno T.⁵ Příklad pyruvátu využívám proto, že jsme na tuto molekulu narazili už v první kapitole. Může vznikat v hydrotermálních průduších z oxidu uhličitého a vodíku, které jsou katalyzovány průduchovými minerály. Ale pyruvát v tomto směru není ojedinělý. Veškeré prekurzory předcházející aminokyselinám jsou součástí niterného biochemického procesu všech buněk, Krebsova cyklu, a k jejich vytváření by mělo docházet v druhu hydrotermálních průduchů popsaném v první kapitole. Z toho lze, prozatím ještě na vcelku chatrných základech, které ale brzy posílí, odvodit, že mezi hydrotermálními průduchy a prvním písmenem tripletového kódu je spojitost.

A co druhé písmeno? Zde je spojovacím článkem stupeň rozpustnosti či nerozpustnosti aminokyseliny ve vodě, jiným slovem její hydrofobnost. Hydrofilní aminokyseliny se ve vodě rozpouštějí, zatímco hydrofobní aminokyseliny jsou nemísitelné a rozpouštějí se namísto toho v živočišných či rostlinných tucích, jako jsou tukové buněčné membrány. Aminokyseliny lze roztřídit do stupnice začínající na „silně hydrofobní“ a končící na „silně hydrofilní“, a právě tato stupnice má vztah k druhému písmenu tripletového kódu. Pět ze šesti nejhydrofobnějších aminokyselin má uprostřed písmeno T, zatímco všechny nejhydrofilnější mají jako prostřední písmeno A. Ty mezi tím tam mají buď G, nebo C. Podtrženo sečteno lze říct, že mezi prvními dvěma pozicemi každého kodonu a kódovanou aminokyselinou panují silné deterministické vztahy, ať už je příčina jakákoli.

V posledním písmenu spočívá zmiňovaná degenerace, přičemž osm aminokyselin je (a je to skutečně působný pojem) čtyřnásobně degenerovaných. Zatímco většina lidí si pod „čtyřnásobně degenerovaným“ představí potácejícího se opilce, který se tak tak zvládne

postupně zhroutit do čtyř různých stok, biochemici tím myslí jen to, že třetí písmeno kodonu nenese žádnou informaci: nezáleží na tom, která báze na této pozici je, protože všechny čtyři možnosti kódují stejnou aminokyselinu. Například u glycinu, kódovaného trojicí GGG, může být poslední G bez obav zaměněno za T, A nebo C – všechny trojice jsou tak jako tak kódem pro glycin.

Degenerovanost kódu ve třetím písmenu má několik zajímavých důsledků. Už jsme zaznamenali, že dubletový (dvojmístný) kód může kódovat 16 ze 20 různých aminokyselin. Pokud vyřadíme 5 nejsložitějších aminokyselin (takže nám jich zbude 15 a jeden zastavovací kodon), vzorce spojené s prvními dvěma písmeny kódu se stanou ještě významnějšími. Mohlo by to tedy být tak, že prvotní kód býval dubletový a že až později se rozšířil na kód tripletový, a to prostřednictvím „lapaní kodonu“; aminokyseliny mezi sebou o třetí písmeno soutěžily. Pokud by to platilo, pak by ty nejstarší aminokyseliny měly v „zabírání“ trojmístných kodonů „neférovou“ výhodu, a zdá se, že to tak i platí. Například 15 aminokyselin, nejpravděpodobněji kódovaných raným dubletovým kódem, si mezi sebou rozebralo 53 ze 64 možných trojic, v průměru tedy na jednu aminokyselinu připadá 3,5 kodonu. Oproti tomu 5 „pozdějších“ aminokyselin nasbíralo jen 8 kodonů, průměrně tedy pouhých 1,6. Skutečně se zdá, že kdo dřív přijde, ten dřív mele.

Připusťme teď možnost, že kód byl původně dubletový, nikoli tripletový, a kodoval celkem 15 aminokyselin (plus jeden „zastavovací“ kodon). Tento raný kód se zdá být téměř beze zbytku deterministický, jinak řečeno je určován fyzikálními a chemickými faktory. Pravidla, že první písmeno souvisí s prekurzorem a že druhé písmeno se pojí s hydrofobností aminokyseliny, připouštějí jen minimum výjimek. Je zde jen nepatrný prostor pro náhodu a fyzikální pravidla neponechávají ničemu volnost.

Ale se třetím písmenem je to jinak. Díky jeho flexibilitě zde byl prostor pro působení náhody, a přirozený výběr tak dostal možnost kód „optimalizovat“. Tak každopádně zněla radikální teze dvou ang-

lických molekulárních biologů, Lawrence Hursta a Stephena Freelanda, zformulovaná ve druhé polovině 90. let. Tato dvojice se dostala na první stránky vědeckých časopisů, když porovnála genetický kód s miliony kódů, náhodně vygenerovaných počítačem. Vzali v potaz škody napáchané bodovými mutacemi, při nichž se jedno písmeno kodonu mění za jiné. Který kód, tázali se, dovedl takovým bodovým mutacím nejlépe čelit, ať už zachováním původní podoby, nebo nahrazením měněné aminokyseliny jinou, podobnou? Zjistili, že skutečný genetický kód je překvapivě odolný vůči změnám: bodové mutace často zanechají sekvenci aminokyselin neporušenou, a i když dojde ke změně, bývá kompenzována fyzicky podobnou aminokyselinou. Hurst s Freelandem vlastně prohlásili, že genetický kód je lepší nežli milion jiných, náhodně vygenerovaných kódů. Kód zdaleka není jen výsledkem zaslepeného kryptografického poblouznění Matky přírody – je doslova jedním z milionu. Nejenže je odolný vůči změnám, pokračovali, ale omezováním katastrofálních následků přeci jen proběhnuvších změn kód ve skutečnosti urychluje evoluční proces: je logické, že pokud následky mutací nejsou katastrofální, je pravděpodobnější, že jsou prospěšné.

Kromě zásahu vyšší moci existuje pro optimalizaci jen jediné vysvětlení, a tím je proces přirozeného výběru. V tom případě se kód života musel vyvinout. Množství nevýznamných variací v „univerzálním“ kódu mezi bakteriemi a mitochondriemi jistě ukazuje, že kdyby nic jiného, kód se vyvíjet může, přinejmenším za výjimečných okolností. Ale stejně jako Crick se můžete ptát, jak se mění, aniž by způsobil katastrofu? Odpověď zní: odděleně. Je-li aminokyselina kódována čtyřmi nebo dokonce šesti různými kodony, některé bývají využívány častěji než ostatní. Ty málo používané kodony je prakticky možné přidělit jiné (i když pravděpodobně podobné) aminokyselině bez katastrofálních následků. A tak se kód vyvíjí.

Vzato kolem a kolem, „kódem v kodonech“ je myšlen fyzický proces, původně související s biosyntézou a rozpustností aminokyselin,

následovanými expanzí a optimalizací. Otázka zní, u kterého druhu fyzického procesu se přirozený výběr projevil nejdříve?

Odpověď je nejistá a v otázce se skrývá několik obtížných překážek. Jednou z těch nejstarších je problém vejce nebo slepice vztažený na DNA a bílkoviny. Spočívá v tom, že DNA je víceméně inertní a i k tomu, aby se mohla sama replikovat, potřebuje určité bílkoviny. Na druhou stranu určité bílkoviny se nestávají určitými náhodou. Vyvíjejí se prostřednictvím přirozeného výběru, a aby k tomu mohlo docházet, musí být jejich stavba jednak dědičná a jednak nestálá. Bílkoviny nejsou samy sobě žádným dědičným vzorem: kóduje je DNA. A tak se bílkoviny nemohou vyvíjet bez DNA a DNA se nemůže vyvíjet bez bílkovin. Pokud by se jedno nemohlo vyvíjet bez druhého, pak by nikdy nemohl začít přirozený výběr.

Poté, uprostřed 80. let, přišlo nečekané zjištění, že RNA působí jako katalyzátor. RNA jen zřídka vytvoří dvojšroubovici, namísto toho utváří složité tvarované molekuly, které se zapojují do katalýzy. RNA tak nekonečnou smyčku přerušuje. V hypotetickém „světě RNA“ přebírá roli jak bílkovin, tak DNA a spolu s ještě mnoha dalšími reakcemi funguje jako katalyzátor vlastní syntézy. Najednou už kód nemusel vycházet jen z DNA: mohl vzniknout z přímých interakcí RNA s bílkovinami.

To dávalo smysl s přihlédnutím k fungování moderních buněk. V dnešních buňkách nedochází k žádným přímým interakcím mezi DNA a aminokyselinami, ale během bílkovinné syntézy jsou mnohé základní reakce katalyzovány enzymy RNA, zvanými ribozymy. Pojem „svět RNA“ poprvé použil Watsonův kolega z Harvardu jménem Walter Gilbert v jednom z nejčtenějších článků všech dob časopisu *Nature*. Ta myšlenka měla na obor úžasný vliv a pátrání po tajemství kódu života se přesunulo od otázky „jak DNA kóduje bílkoviny“ k „jaké interakce musely proběhnout mezi RNA a aminokyselinami“. Odpověď však ještě ani zdaleka nebyla zřejmá.

Vzhledem k nadšenému zaujetí světem RNA je možná překvapivé, že katalytické vlastnosti menších fragmentů RNA byly z větší části

přehlíženy. Pokud dovedou velké molekuly RNA katalyzovat různé reakce, je pravděpodobné, že malé fragmenty – jednotlivá „písmena“ nebo dvojice „písmen“ – mají také katalytické schopnosti, i když ne tak silné. Nový výzkum obávaného amerického biochemika Harolda Morowitze, spolupracujícího s molekulárním biologem Shelleyem Copleym a fyzikem Erikem Smithem, přesně na tuto možnost ukazuje. Jejich myšlenka může být chybná, ale domnívám se, že právě po takovém druhu teorie bychom se ve snaze objasnit původ kódu života měli poohlížet.

Morowitz se svými kolegy vyslovil domněnku, že dvojice písmen (odborně „dinukleotidy“) se chovají jako katalyzátory. Podle nich se dinukleotid navazoval na aminokyselinový prekurzor – jako je pyruvát – a katalyzují jeho přeměnu v aminokyselinu. To, která aminokyselina se utvoří, závisí na písmenech spojených do dvojic v dinukleotidu (v souladu s kódem v kodonech zmíněném výše). V podstatě je to tak, že první písmeno určuje aminokyselinový prekurzor a druhý typ přeměny. Jsou-li například na prvních dvou pozicích písmena UU, navazuje se pyruvát a mění se na poměrně hydrofobní aminokyselinu leucin. Morowitz tuto příjemně nekomplikovanou domněnku poděpřel některými důmyslnými reakčními mechanismy, díky čemuž se zdá přinejmenším věrohodná, i když bych uvítal zkumavku s nějakými důkazy, že popisované reakce skutečně probíhají.

V tomto bodě nás od tripletového kódu alespoň v zásadě dělí už jen dva kroky, přičemž ani v jednom nejde o nic víc než o obyčejné párování písmen. V prvním kroku se molekula RNA prostřednictvím obyčejného párování bází naváže na dvoumístný dinukleotid: G na C, A na U a tak dále. Aminokyselina se pak přemístí k větší RNA, která díky své velikosti disponuje větší přitažlivou silou.⁶ Výsledkem je RNA navázaná na aminokyselinu, jejíž podoba je odvislá od písmen, z nichž se předtím skládal dinukleotid. V podstatě jde o prototyp Cric-kova „adaptéru“, RNA se „správnou“ aminokyselinou.

V posledním kroku se dvoumístný kód proměňuje ve tripletový a znovu se přitom nestaví na ničem složitějším, než je obyčejné páro-

vání bází v rámci RNA. Pokud takové interakce fungují lépe s tripletovým kódem než s dvoustupňovým (snad díky lepšímu nahuštění nebo vazební síle), pak jednoduše dojde k přechodu na tripletový. V něm jsou první dvě písmena vymezena syntézou, zatímco třetí se může v rámci určitých omezení obměňovat, a umožňuje tak v pozdějším stádiu optimalizaci. Řekl bych, že v tomto ohledu mohl mít Crick se svým originálním pojetím RNA, kterou připodobňoval k selatům přisátým k matce, pravdu: prostorová omezení mohla přilehlou RNA skutečně dotlačit k „průměrnému“ počtu tří písmen. Povšimněme si, že zde stále ještě není žádný čtecí rámec ani žádné bílkoviny, jen aminokyseliny vzájemně reagující s RNA. Ale už existoval základ kódu a další aminokyseliny mohly být později přidány lapením volných trojmístných kodonů.

Celý popisovaný scénář je bezpochyby značně spekulativní a zatím je podložen jen nevelkým množstvím důkazů. Jeho velký přínos spočívá v tom, že objasňuje původ kódu a uvěřitelnou, testovatelnou formou nás dovádí od jednoduchých chemických vazeb k trojmístným kodonům. I tak se vám může zdát, že je to sice všechno moc hezké, ale že kolem sebe pořád mávám RNA, jako by rostla na stromech. Když už jsme u toho, jak se vlastně od jednoduchých chemických vazeb dostaneme k výběru bílkovin? A jak se od RNA dostaneme k DNA? Shodou okolností se na tyto otázky nabízí řada fascinujících odpovědí, podepřených překvapivými objevy z několika posledních let. Je příjemné, že ony nové objevy krásně zapadají do teorie o vývoji života v hydrotermálních průduších popsané v první kapitole.

První otázka zní, odkud se všechna ta DNA bere? I přes dvě desetiletí intenzivních výzkumů světa RNA se o to jen zřídka někdo vážně zajímal. Nevyslovený a upřímně řečeno i nesmyslný předpoklad zní, že „zkrátka už byla“ obsažená v prvotní polévce.

Nesnažím se být nijak jízlivý. Věda naráží na mnoho problémů a nelze je všechny rázem vyřešit. Úžasná vysvětlovací schopnost světa RNA staví na „daném“ předpokladu: předem existující RNA. Pro

objevitele světa RNA nebylo podstatné, odkud se RNA vzala; výzkum se točil kolem otázky, co dovede. Jiní se jistě zajímali o syntézu RNA, ale byli rozštěpení do několika nesmiřitelně rozhádaných frakcí, hašteřících se mezi sebou o preferovaných hypotézách. Možná se RNA syntetizovala ve vesmíru z kyanidu; možná se vytvořila tady na Zemi při úderu blesku do metanu a čpavku; možná vznikla v sopce z kořičního zlata. Každý z těch scénářů měl určité výhody, ale všechny sdílely stejný základní problém, „problém koncentrace“.

Už jen stvořit jednotlivá písmena RNA (nukleotidy) je samo o sobě dost obtížné, ale k jejich spojení v polymer (plnohodnotnou molekulu RNA) může docházet jen tehdy, jsou-li nukleotidy vysoce koncentrované. Je-li nukleotidů velké množství pohromadě, začnou se spontánně zhušťovat do dlouhých řetězců. Ale je-li koncentrace nízká, stane se pravý opak: RNA se začne rozpadat na jednotlivé nukleotidy. Problém spočívá v tom, že kdykoli se RNA replikuje, spotřebovává nukleotidy, a snižuje tak jejich koncentraci. Není-li zásoba nukleotidů neustále znovu doplňována – a to rychleji, než je spotřebovávána – pak svět RNA nemůže fungovat, ať už toho vysvětlí sebevíc. Tak by to nešlo. A pro ty, kdo se chtěli věnovat produktivní vědecké činnosti, bylo zkrátka nejlepší pokládat přítomnost RNA za danou.

A udělali dobře, protože odpověď před svým dramatickým odhalením musela urazit ještě dlouhou cestu. Je pravda, že RNA neroste na stromech, ale zato roste v průduších, nebo alespoň v jejich simulacích. Ve významné teoretické práci z roku 2007 prohlásil neúnavný geochemik Mike Russell (naš známý z první kapitoly), který spolupracoval v Německu s Dieterem Braunem a jeho kolegy, že by se nukleotidy měly v ohromných množstvích hromadit v průduších. Příčinou jsou tamní silné tepelné gradienty. Připomeňme si zjištění z první kapitoly, že zásadité hydrotermální průduchy jsou protkány navzájem propojenými póry. Tepelné gradienty vytvářejí dva druhy proudů, které těmito póry kolují, a to konvekční proudy (jako ve varné konvici) a tepelnou difuzi (rozptylování tepla v chladnější vodě). Mezi těmito dvěma tepelnými proudy postupně dochází k zanášení

níže položených pórů množstvím malých molekul včetně nukleotidů. V simulovaném hydrotermálním systému dochází ke koncentraci nukleotidů v tisíckrát a dokonce i milionkrát vyšších úrovních, než byla ta počáteční. Při tak vysokých koncentracích by se nukleotidy měly hladce shlukovat do řetězců RNA a DNA. Autoři došli k závěru, že tyto podmínky představují: „startovací čáru pro molekulární evoluci života s neodolatelně vysokou koncentrací“.

Ale průduchy toho svedou víc. U delších molekul RNA a DNA teoreticky dochází k hromadění v ještě větší míře než u jednotlivých nukleotidů: díky své velikosti mohou pravděpodobněji zanášet póry. Molekuly DNA, složené ze 100 párů bází, podle všeho dokážou hromadit přímo neuvěřitelně, až do trilionkrát větších koncentrací, než je ta počáteční. Tak vysoká koncentrace by v zásadě měla umožňovat všechny reakce, o kterých jsme se bavili, jako například vzájemné navazování molekul RNA a tak dále. A co víc, oscilující teplota (tepelný cyklus) napomáhá replikaci RNA stejně, jako to dělá široce používaná laboratorní technika PCR (polymerázová řetězová reakce). Při PCR vysoké teploty rozplétají DNA, která pak funguje jako šablona, zatímco kondenzace při nižších teplotách umožňuje doplňujícímu vláknku polymerizovat. Výsledkem je exponenciálně se zrychlující replikace.⁷

Podtrženo sečteno, díky tepelným gradientům dochází v průduších ke koncentraci jednotlivých nukleotidů až na extrémně vysokou úroveň, což napomáhá tvorbě RNA. Tytéž gradienty by pak měly koncentrovat RNA a pomáhat fyzickým interakcím molekul. A konečně by kolísající teploty měly napomáhat replikaci RNA. Prvotní svět RNA by to sotva mohl mít zařízení lépe.

Přejděme teď k druhé otázce: jak se od replikujících se RNA, které si navzájem konkurují, dostaneme k sofistikovanějšímu systému, v němž se RNA začíná kódovat v bílkoviny? Odpověď se znovu ukrývá v průduších.

Dáte-li RNA – spolu se surovinami a energií (jako ATP), které potřebuje – do zkumavky, bude se replikovat. Vlastně se bude nejen replikovat, ale v souladu s objevy biologa Sola Spiegelmana a dalších

v 60. letech se bude i vyvíjet. RNA se s každou zkumavkovou generací replikuje rychleji a rychleji, až se stane přímo hrozivě výkonnou. Promění se ve Spiegelmanovu příšeru – hojně se replikující vlákno RNA, schopné jen té nejběžší a nejumělejší existence. Kupodivu nezáleží na tom, odkud se začíná: můžete začít s celým virem nebo s uměle vytvořenou částí RNA. Dokonce můžete začít i se směsí nukleotidů a polymerázou, která by je dokázala shluknout dohromady. Ať začínáte kdekoli, vždy budete směřovat ke stejné „příšerě“, stejnému zběsile se reprodukujícímu vlákně RNA, dlouhému sotva padesát písmen, Spiegelmanově příšerě. Jako by šlo o jakousi molekulární obdobu řeky, která vždy nakonec doteče do moře, ať pramení kdekoli.

Vtip je v tom, že se Spiegelmanova příšera nestává stále složitější. Příčinou toho, že končí jako série padesáti písmen, je, že jde o navazovací sekvenci pro enzym replikázy, bez něhož by se spirála vůbec nemohla replikovat. RNA si tak v podstatě nevidí dál než na špičku nosu a nikdy z ní nevzejde nic složitějšího. Takže jak a proč se RNA začala kódovat pro bílkoviny na úkor vlastní rychlosti replikace? Ze začarovaného kruhu vede jen jedna cesta, a tou je přirozený výběr na „vyšší úrovni“. RNA se stává součástí větší entity, která je pak jednotkou přirozeného výběru, například buňky. Problém je, že všechny organické buňky jsou příliš složité na to, aby se vynořily jen tak odnikud bez evoluce, tedy musí probíhat spíš přirozený výběr vlastností, jež buňky utvářejí, než přirozený výběr rychlosti replikace RNA. Máme tu otázku o vejci a slepici, ke které docházíme stejně nevyhnutelně jako v případě začarovaného kruhu DNA–bílkoviny, i když není tak známá.

Už jsme si vysvětlili, že RNA začarovaný kruh DNA–bílkoviny krásně prolamuje; ale co prolamuje kruh přirozeného výběru? Odpověď máme přímo pod nosem: jsou to už hotové anorganické buňky v hydrotermálních průduších. Takové buňky jsou zhruba stejně velké jako buňky organické a neustále se vytvářejí v aktivních průduších. Pak se tedy, je-li obsah buňky obzvláště dobrý v regeneraci surovin potřebných k vlastní replikaci, začne buňka replikovat a pomalu vy-

tvářet nové anorganické buňky. Oproti tomu „sobecká“ RNA, která se replikuje plnou rychlostí, prodělává, jelikož neumí dost rychle obnovovat suroviny potřebné k udržení vlastního replikačního procesu.

Jinými slovy, v prostředí průduchů postupně přestává být výhoda v přirozeném výběru dána rychlostí replikace jednotlivých molekul RNA a hlavní roli začíná hrát celý „metabolismus“ individuálně se chovajících buněk. A bílkoviny jsou, kromě jiného, především mistry v provozování metabolismu. Bylo nevyhnutelné, že časem zaujmou místo RNA. Ale bílkoviny samozřejmě nevznikly jen tak ze dne na den; je pravděpodobné, že k vytvoření modelového metabolismu přispěly minerály, nukleotidy, RNA, aminokyseliny i molekulární komplexy (například aminokyseliny, které se navazují na RNA). Podstatné je, že co začalo jako prosté chemické vazby mezi molekulami, se v tomto světě přirozeně se množících buněk změnilo v pátrání přirozeného výběru po schopnosti reprodukovat obsah celých buněk. Přirozený výběr hledal soběstačnost a ve výsledku i schopnost samostatné existence. A paradoxně je to právě samostatná existence dnešních buněk, která nám poskytuje poslední vodítko v pátrání po původu DNA.

Mezi bakteriemi existuje výrazná diferenciacie. Jejím nesmírným významem pro náš vlastní vývoj se budeme zabývat ve čtvrté kapitole. Prozatím se zaměříme pouze na to, co vypovídá o původu DNA. Zmíněný rozkol panuje mezi eubakteriemi (což je výraz přejatý z řečtiny a znamená „pravé“ bakterie) a druhou skupinou, která vypadá, že je ve všech ohledech úplně stejná. Bakterie druhé skupiny se nazývají archebakterie či jednodušeji archea. Jejich název vychází z domněnky, že jsou mimořádně archaické či rovnou prastaré, ačkoli jen málokdo dnes věří, že jsou starší než pravé bakterie.

Ve skutečnosti by to mohlo být tak, že jakousi skoro neuvěřitelnou shodou náhod vzešly bakterie i archea ze stejných hydrotermálních průduchů. Sotva lze jinak vysvětlit, že se shodují v genetickém kódu i v mnoha detailech typu syntézy bílkovin, ale replikovat svou DNA se evidentně naučily až později, a to zcela nezávisle na sobě. DNA a ge-

netický kód se totiž zcela určitě vyvinuly jen jednou, zatímco replikace DNA – fyzický mechanismus dědičnosti, ukrytý ve všech živých buňkách – se vyvinula dvakrát.

Kdyby takové tvrzení vyslovil někdo menší než Eugene Koonin, puntičkářský a intelektuálský americký výpočetní genetik ruského původu, jenž pracuje v Národním zdravotním institutu ve Spojených státech, měl bych své pochybnosti. Ale od Koonina a jeho kolegů to nebyl pokus o prokázání nějaké radikální teorie. Na onu skutečnost narazili při systematickém sběru dat o replikaci DNA v bakteriích a archeích. Z podrobných srovnání genetických sekvencí Koonin a jeho kolegové zjistili, že bakterie i archea ve značné míře sdílejí stejné mechanismy syntézy bílkovin. Například způsob, kterým se DNA přepisuje do RNA a kterým je pak RNA převáděna do bílkovin, je v zásadě podobný a bakterie i archea při něm využívají enzymy, které (podle svých genetických sekvencí) očividně zdědily po společném předkovi. S enzymy, potřebnými k replikaci DNA, je tomu ovšem úplně jinak. Ve většině případů nemají vůbec nic společného. Tuto zajímavou skutečnost lze vysvětlit jen jejich hlubokou rozdílností. V tom případě nutně vyvstává otázka, proč stejně hluboká rozdílnost u přepisu a převodu DNA k tak dokonalé nestejnosti nevedla? Nejjednodušší vysvětlení nabízí Kooninova převratná hypotéza: replikace DNA se vyvinula dvakrát, jednou v archeích a jednou v bakteriích.⁸

Takové tvrzení se muselo mnohým zdát nemyslitelné, ale pro vynikajícího, laskavého a „drzého“, v Německu pracujícího Texasana to bylo přesně to pravé. Biochemik Bill Martin, se kterým jsme se už seznámili v první kapitole, se už stihl spojit s Mikem Russellem za účelem pátrání po počátcích biochemie v hydrotermálních průduších. Společně se vydali proti proudu tradičního přesvědčení a v roce 2003 zformulovali vlastní teorii: že společným předkem bakterií i archeí nebyl žádný volně žijící organismus, ale spíše jakýsi replikátor související s porézním kamenem; ještě se mu nepodařilo uniknout z minerálních komůrek, jimiž byly hydrotermální průduchy protkané. Na podporu své domněnky sepsali Martin s Russellem seznam dalších

propastných rozdílů mezi bakteriemi a archei. Šlo hlavně o skutečnost, že jejich buněčné membrány a stěny jsou naprosto rozdílné, což naznačuje, že obě skupiny vzešly ze stejného, kamenitého prostředí nezávisle na sobě. Mnohým se taková myšlenka zdála přehnaně radikální, ale na Kooninova pozorování pasovala jako ulitá.

Netrvalo dlouho a Martin s Kooninem se společně zamysleli nad vznikem genů a genomů v hydrotermálních průduších – svůj podnětný pohled na toto téma publikovali v roce 2005. Vyslovili tezi, že „životní cyklus“ minerálních komůrek mohl připomínat moderní retroviry, jako je HIV. Retroviry mají jen nepatrný genom, zakódovaný do RNA místo do DNA. Když retroviry proniknou do buňky, zkopírují svou RNA do její DNA pomocí enzymu zvaného „reverzní transkriptáza“. Nová DNA je nejprve začleněna do hostitelova genomu a pak přepsána do genů hostitelské buňky. Takže má-li virus vytvářet mnohočetné kopie sebe sama, pracuje s DNA; ale má-li přejít do další generace, spolehne se v přenosu dědičných informací na RNA. Za povšimnutí stojí, že mu schází schopnost replikovat DNA, což je obecně vcelku těžkopádná procedura vyžadující spoustu enzymů.

Takový životní cyklus má jak výhody, tak nevýhody. Jeho velkou výhodou je rychlost. Převzetím mechanismu hostitelovy buňky pro přepis DNA do RNA a převod RNA do bílkovin se retroviry zbavují potřeby mít velké množství různých genů, což jim šetří spoustu času i potíží. Velkou nevýhodou je skutečnost, že jejich existence zcela závisí na „vhodných“ buňkách. A druhou, méně zřejmou nevýhodou je, že RNA je v porovnání s DNA horší v přechovávání informací. Je chemicky méně stabilní, jinými slovy je reaktivnější než DNA. Díky tomu ostatně RNA katalyzuje biochemické reakce. Ale tato reaktivita znamená, že velké genomy RNA jsou nestabilní a rozpadají se, což nastavuje velikostní limit o kus níže, než by bylo potřeba pro možnost samostatné existence. Retrovirus je v podstatě už skoro tak složitý, jak jen biologická entita kódovaná pouze v RNA může být.

Ale ne v minerálních komůrkách. Komůrky skýtají dvě výhody, které umožňují vývoj složitějším RNA formám života. Tou první je

fakt, že v průduších je volně k dispozici mnohé z toho, co je pro samostatnou existenci nezbytné, což buňkám pro začátek pomáhá: přibývající minerální komůrky jim rovnou poskytnou prostorové omezení, energii a tak dále. V jistém smyslu už je pak sebereplikující RNA, která průduchy obývá, virová. Druhou výhodou je, že se „shluky“ RNA prostřednictvím propojených komůrek neustále promíchávají a párují; a dobře „spolupracující“ skupinky, které se ve vzájemné shodě vydají osídlit nově vznikající komůrky, mohou sítím výběru projít společně.

A tak Martin s Kooninem předpověděli existenci celých populací spolupracující RNA, které vznikají v minerálních komůrkách, kdy každá RNA kóduje hrstku spřízněných genů. Nevýhodou takového uspořádání je samozřejmě to, že takovým populacím RNA by hrozilo mísení do jiných, patrně nevhodnějších kombinací. Buňka, které se podaří udržet si svůj „genom“ pohromadě tím, že skupinu spolupracující RNA převede do jediné molekuly DNA, si všechny výhody uchová. Její replikace by pak připomínala chování retroviru – její DNA by se přeměnilo do smršti RNA, která by infikovala okolní buňky a předala jim stejnou dovednost uložit informace zpátky do banky DNA. Každá nová taková smršť by tedy byla čerstvě vychrlena z banky, a tudíž by bylo méně pravděpodobné, že v sobě nese chyby.

Jak obtížné by pro minerální komůrky bylo „vynalézt“ v takových podmínkách DNA? Patrně nijak zvlášť; vlastně by to bylo mnohem jednodušší, než vynalézat celý systém replikace DNA (místo RNA). Mezi RNA a DNA jsou jen dva nepatrné chemické rozdíly, které ovšem způsobují ohromný rozdíl v jejich stavbě: rozdíl mezi svinutými, katalytickými molekulami RNA a slavnou dvojšroubovicí DNA (jak si ji mimochodem představovali Crick a Watson ve svém originálním příspěvku do časopisu *Nature* z roku 1953).⁹ Obě tyto změny by v průduších proběhly v podstatě spontánně a téměř nevyhnutelně. Tou první je odstranění jednoho atomu kyslíku z RNA (kyseliny ribonukleové) a jeho předání kyselině deoxyribonukleové neboli DNA. I dnešní mechanismus stále ještě obsahuje stejný druh reaktivních prostředníků

(odborněji „volných radikálů“), jaké se vyskytují v průduších. Druhým rozdílem je přidání „metylové“ skupiny (CH_3) k písmenu U – uracilu za účelem tvorby tyminu. Dlužno připomenout, že metylové skupiny jsou reaktivní odštěpky plynného metanu, který je v zásaditých průduších velmi běžný.

Tvorba DNA tedy mohla být relativně snadná: mohla se zformovat „spontánně“ v průduších v podobě RNA (čímž mám na mysli, že její zformování z jednoduchých prekurzorů by bylo katalyzováno minerály, nukleotidy, aminokyselinami a tak dále). O trochu obtížnější trik by spočíval v udržení kódované zprávy, jinak řečeno ve zhotovení přesné kopie sekvence písmen z RNA, tentokrát ve formě DNA. Ovšem ani v takovém případě nejsou problémy nepřekonatelné. K převodu RNA do DNA je zapotřebí jediného enzymu: reverzní transkriptázy, tolik ceněné retroviry, jako je dnešní HIV. Paradoxně tento jediný enzym, jenž „boří“ ústřední dogma celé molekulární biologie – DNA vytváří RNA a ta vytváří bílkovinu – byl nejspíše také tím enzymem, který proměnil porézní, virovou RNA zamořený kámen v život, jak ho známe dnes! Je možné, že za samotný zrod buněk vděčíme pouhému retroviru.

V tomto vyprávění toho spousta zůstává nevyřešena a mnohé hádanky jsem vynechal ve snaze vystavět příběh, který by alespoň mně připadal srozumitelný. Nedovolím si tvrdit, že všechny zde popisované důkazy vedou k nějakému jednoznačnému závěru nebo že jsou něčím víc než jen vodítky pro zkoumání nejdávnější minulosti. Ale jsou to vodítka, s nimiž se bude muset vypořádat jakákoli teorie, která se ukáže být pravdivou. Tepelné proudění v hlubokomořských průduších skutečně hromadí nukleotidy, RNA a DNA a vytváří tak ze sítě minerálních komůrek ideální svět RNA. A mezi archei a bakteriemi skutečně jsou výrazné rozdíly, nad kterými nelze jen tak mávnout rukou. A to vše rozhodně naznačuje, že na počátku měl život retrovirální životní cyklus.

Upřímně mne těší, že příběh, který jsme tu vystavěli, by mohl být pravdivý, ale v hlavě mi pořád hlodá ještě jedna velká neznámá: výše

zmíněné totiž naznačuje, že buněčný život vznikl v hlubokomořských průduších hned dvakrát. Zamořila hemžící se RNA okolní průduchy a rozšířila se tak postupně po celých oceánech, což umožnilo přirozenému výběru působení v globálním měřítku? Nebo bylo na jedné konkrétní soustavě průduchů něco jedinečně příznivého a díky výsledným atypickým podmínkám v ní vznikly jak archea, tak bakterie? To se možná nikdy nedozvíme, i tak bychom se ale všichni nad tou hrou náhody a nezbytnosti měli zamyslet.

Kapitola 3: Fotosyntéza

Na sluneční pohon

Představte si svět bez fotosyntézy. Zaprvé by nebyl zelený. Smaragdové zabarvení naší planety vychází z velkolepé masy rostlin a řas a z jejich zelených pigmentů, které ve fotosyntéze pohlcují světlo. Tím nejpřednějším z pigmentů je vynikající převodník – chlorofyl, který si ukradne sluneční paprsek, promění ho na chemickou energii a pohání jí životy rostlin i zvířat.

Planeta by nejspíš nebyla ani modrá, protože azurová modř nebe a oceánů závisí na čistotě vzduchu i vody, zbavovaných kalu a prachu silou kyslíku. A bez fotosyntézy by žádný volný kyslík nebyl k dispozici.

Vlastně by tu možná ani žádné oceány nebyly. Bez kyslíku není ozón a bez něj prakticky nic netlumí pronikavou sílu ultrafialových paprsků. Ty dělí vodu na kyslík a vodík. Kyslík se tvoří pomalu a ve vzduchu se nehromadí, místo toho jen reaguje s železem v horninách a pokrývá je rudou rzí. A vodík, nejlehčí ze všech plynů, se vytrhává z gravitačních pout a mizí do vesmíru. Ten proces je možná pomalý, ale také je zcela neúprosný: oceány krvácejí do vesmíru. Ultrafialové záření už připravilo o oceány Venuši a snad i Mars.

Abychom si tedy představili svět bez fotosyntézy, nepotřebujeme bůhvíjakou fantazii: velice by se podobal Marsu. Byl by rudý, prašný, bez oceánů a bez zjevných známek života. Existuje samozřejmě i život bez fotosyntézy a mnoho astrobiologů po něm na Marsu pátrá. Ale i kdyby se našlo pár bakterií skrývajících se pod povrchem nebo pohřbených v polárních čepičkách, planeta sama je mrtvá. Panuje na

ní takřka dokonalá rovnováha, nezaměnitelná známka strnulosti. S Gaiou by si ji asi nikdo nespletl.

Klíčem k existenci života na planetě je kyslík. Kyslík, odpad vzniklý při fotosyntéze, je skutečně molekulou, která hýbe světem. Při fotosyntéze se uvolňuje takovým tempem, že ve výsledku úplně zahltí schopnost planety ho zpracovat. Dochází k tomu, že všechny prach a všechno železo v horninách, všechna síra v mořích a všechny metan ve vzduchu, všechno, co může oxidovat, je zoxidováno a do vzduchu a oceánů začne proudit volný kyslík. Když se tam dostane, přestane planeta ztrácet vodu. Když se vodík uvolní z vody, pak před svým únikem do kosmu nevyhnutelně narazí do kyslíku. S ním rychle zareaguje a vytvoří vodu, která pak prší z nebe dolů, a oceány přestanou mizet. A když se kyslík nahromadí ve vzduchu, vznikne ozónová vrstva, o níž se otupí vražedné ostří ultrafialových paprsků a planeta se stane obyvatelnější.

Kyslík nejenže zachraňuje planetu, on ještě pohání všechny život a stará se o jeho růst. Bakterie se bez kyslíku hladce obejdou – jejich elektrochemickým schopnostem není rovno a reakcí prakticky se všemi molekulami umí získat trochu energie. Ale celková suma energie, která může vzejít z fermentace nebo ze vzájemné reakce dvou molekul typu metanu a síranu, je zanedbatelná ve srovnání s tou, která pochází z respirace kyslíku – což je doslova spalování potravin pomocí kyslíku, při němž dochází k plné oxidaci na oxid uhličitý a vodní páru. Nic jiného nemůže poskytnout dostatek energie k uspokojení požadavků mnohobuněčného života. Všechna zvířata, všechny rostliny, vše je přinejmenším v jednom životním stádiu závislé na kyslíku. Jedinou výjimkou, o které vím, je mikroskopická (ale mnohobuněčná) hlístice, jíž se nějak daří přežívat ve stojatých, kyslík postrádajících hlubinách Černého moře. Takže svět bez volného kyslíku je mikroskopický, přinejlepším na úrovni jednotlivých organismů.

Kyslík napomáhá dorůstání do větší velikosti i jinak. Vezměte si například potravní řetězec. Ti nejvýše umístění dravci požírají menší

zvířata, která mohou zase požírat hmyz, jenž se živí menším hmyzem, požírajícím listy a houby. Nemá neobvyklé, aby měl potravní řetězec i pět nebo šest úrovní. S každou úrovní mizí energie, protože žádná forma respirace není stoprocentně efektivní. Efektivita respirace kyslíku se pohybuje kolem 40 %, zatímco u většiny ostatních forem respirace (využívajících místo kyslíku například železo nebo síru) se pohybuje pod 10 %. To znamená, že bez použití kyslíku se dostupná energie už v prvních dvou úrovních smrskne na pouhé 1 % původního množství, zatímco s kyslíkem se cesta do stejného bodu táhne přes šest úrovní. A to zase znamená, že dlouhé potravní řetězce jsou životaschopné jen s respirační kyslíkem. Ekonomika potravního řetězce říká, že dravci mohou fungovat ve světě s kyslíkem, ale bez kyslíku se dravčí způsob obživy zkrátka nevyplácí.

Dravci samozřejmě v nekonečných závodech ve zbrojení, které vedou s kořistí, dorůstají do čím dál větších rozměrů. Krunýře jako obrana proti zubům, maskování k ošálení zraku a velikost k zastrášení loveného i lovce. S kyslíkem se může vyplácet být dravcem a dravcům se zase vyplácí být velcí. Díky kyslíku jsou tedy velké organismy nejen životaschopné, ale jejich existence se stává i pravděpodobnou.

Kyslík je významný i při stavbě jejich těl. Bílkovinou, která zvířatům dodává pevnost v tahu, je kolagen. To je hlavní bílkovina všech spojovacích tkání, ať už zvápenatělých do podoby kostí, zubů či krunýřů, nebo obnažených v podobě vaziva, šlach, chrupavek a kůže. Kolagen je tou zdaleka nejhojněji se vyskytující bílkovinou v tělech savců, v nichž tvoří až pozoruhodných 25 % z celkového množství bílkovin. Je i důležitou součástí skořápek, kutikul, krunýřů a všech druhů vláknitých tkání – je tedy učiněným „pojivem“ celé zvířecí říše. Kolagen se skládá z některých neobvyklých stavebních materiálů, které potřebují volný kyslík ke spojování sousedících bílkovinných vláken, dávajících celé struktuře značnou pevnost v tahu. Požadavek volného kyslíku znamená, že velká zvířata chráněná krunýři nebo vybavená silnou kostrou se mohla vyvinout až tehdy, když začalo

množství kyslíku v atmosféře postačovat požadavkům tvorby kolagenu – což mohlo mít podíl na náhlém nárůstu množství velkých zvířat mezi zkamenělinami z počátku kambria, tedy z doby před nějakými 550 miliony let, krátce po globálním zvýšení hladiny kyslíku v atmosféře.

To, že je ke tvorbě kolagenu potřeba kyslík, se může jevit jako pouhá náhoda; kdyby nebylo kolagenu, proč by místo něj nenastoupilo něco jiného bez potřeby volného kyslíku? Je kyslík k získání pevnosti skutečně nezbytný, nebo je jen ingrediencí, která se nahodile připletla a která byla náhodou navěky zapsána do receptu? Odpověď tak docela neznáme. Je však pozoruhodné, že i vyšší rostliny potřebují volný kyslík, který by podpíral jejich stavbu, a to ve formě nesmírně pevného polymeru ligninu, který propůjčuje dřevu jeho pružnou pevnost. Lignin se vytváří z chemického hlediska nahodile, přičemž využívá volného kyslíku k tvorbě silných vazeb mezi řetězci. Ty je velice těžké rozbít, což je důvod, proč je dřevo tak pevné a proč mu trvá tak dlouho, než zetlí. Odstraňte ze stromů lignin – na tento trik se snaží přijít výrobci papíru, kteří ho musí při výrobě pracně odstraňovat z celulózy – a strom se svalí na zem, protože pozbude schopnost nést svou vlastní váhu, i kdyby bylo úplně bezvětrí.

A tak by bez kyslíku nebyla velká zvířata ani rostliny, nebyli by dravci, modrá obloha, možná ani žádné oceány, zkrátka nejspíš nic než prach a bakterie. Kyslík je bez debat tím nejcennějším odpadem, jaký si lze představit. Není to ovšem jen tak ledajaký odpadní produkt – je nepravděpodobný. Je docela dobře možné, že se fotosyntéza mohla vyvinout tady na Zemi, na Marsu nebo kdekoli jinde ve vesmíru, aniž by produkovala nějaký volný kyslík. To by téměř určitě zastavilo život na bakteriální úrovni složitosti, což by znamenalo, že jsme jedinými rozumnými bytostmi ve vesmíru plném bakterií.

Jedním z důvodů, proč se kyslík nikdy nemusel nahromadit ve vzduchu, je respirace. Fotosyntéza a respirace jsou opačné, ale rovno-

cenné procesy. Ve zkratce lze říct, že fotosyntéza vytváří organické molekuly ze dvou jednoduchých molekul, oxidu uhličitého a vody, a energii jí k tomu dodává sluneční světlo. Při respiraci se děje pravý opak. Když spalujeme organické molekuly (jídlo), uvolňujeme do vzduchu oxid uhličitý a vodu a uvolněná energie nás udržuje při životě. Všechna naše energie je osvobozeným paprskem světla, který byl v jídle polapen.

Fotosyntéza a respirace nejsou protikladné jen chemicky, ale i z globálního hlediska. Bez respirace – bez toho, že by zvířata, houby a bakterie spalovaly rostlinnou potravu – by už dávno byl všechen oxid uhličitý, proměněný na biomasu, vysátý z atmosféry. Všechno by se víceméně zastavilo, snad až na nepatrnou trochu oxidu uhličitého uvolňovanou pomalým rozkladem nebo sopečnou činností. Ale ve skutečnosti se děje něco úplně jiného. Ve skutečnosti se při respiraci spalují organické molekuly vytvořené rostlinami: z geologického hlediska rostliny v obláčku dýmu naráz shoří. Má to jeden velice důležitý důsledek. Všechn kyslík, vložený do vzduchu fotosyntézou, je z něj respirační zase odebírán. Nastává dlouhodobá, neměnná, nekončící rovnováha, smrtící pro jakoukoli planetu. Planeta může získat kyslíkovou atmosféru – a vyhnout se tak prašnému, rudému osudu Marsu – jedině tehdy, zůstává-li drobná rostlinná hmota nedotčená, chráněná proti působení živlů a důvtipu, se kterým ji život zkouší rozložit a získat energii. Musí být pod zemí.

A také, že je. Ušetřená rostlinná hmota je v podobě uhlí, ropy, zemního plynu, sazí, dřevěného uhlí nebo prachu pohřbívána do kameňů hluboko v zemských útrobách. Podle průkopnického geochemika Roberta Bernera, jenž nedávno odešel z Yale do důchodu, je v zemské kůře polapeno asi 26 000krát víc „mrtvého“ organického uhlíku, než je ho v celé žijící biosféře. Každý atom uhlíku je protikladem molekuly kyslíku ve vzduchu. S každým atomem uhlíku, který coby fosilní palivo vykopeme a spálíme, je ze vzduchu vyrvána molekula kyslíku, která je se závažnými – i když nepředvídatelnými – důsledky pro klima převedena zpět na oxid uhličitý. Naštěstí se nám spalováním fosil-

ních paliv nikdy nepodaří světovou zásobu kyslíku vyplýtvat, dokonce i přesto, že hazardujeme s globálním klimatem: naprostá většina organického uhlíku je pohřbena v podobě mikroskopické drtě v horninách, jako je břidlice, nedosažitelných lidským průmyslem – nebo přinejmenším ne hospodářským průmyslem. Zatím, i přes všechno naše domyšlivé úsilí o spalení všech známých zásob fosilních paliv, se nám podařilo snížit obsah kyslíku ve vzduchu jen o pouhé dva nebo tři díly z milionu, jinak řečeno o 0,001 %.¹

Ale tato obrovská podzemní zásobárna organického uhlíku se neplní průběžně – byla pohřbívána nárazově během dlouhých geologických období. Obvyklý stav se výrazně blíží naprosté rovnováze, ve které se respirace navzájem ruší s fotosyntézou (a eroze s ukládáním pod zem), takže prakticky k žádnému čistému ukládání nedochází. Proto se hladina kyslíku drží už desítky milionů let kolem 2 %. V dávno minulých geologických obdobích tomu ovšem bývalo vzácně i úplně jinak. Asi nejlépe je to vidět na příkladu období karbonu před 300 miliony let, kdy kolem poletovaly vážky velké jako raci a podrostem se prodíraly metr dlouhé stonožky. Tito obři za svou existenci vděčili výjimečně vysoké míře ukládání uhlíku v období karbonu, které ostatně vděčí svým obrovským zásobám uhlí i za jméno. Jak se uhlík ukládal pod uhelné močály, zvýšil se obsah kyslíku nad 30 %, což některým živočichům umožnilo vyrůst do mnohem větších rozměrů než obvykle – konkrétně pak zvířata, která místo aktivního dýchání plicemi využívala pasivní difúze plynů přes povrch těla nebo vzdušnice, jako je tomu například u vážek.²

Co však bezprecedentní zvýšení míry ukládání uhlíku v období karbonu způsobilo? Téměř bezpochyby se na tom podílela řada nahodilých faktorů. Poloha kontinentů, vlhké podnebí, přítomnost rozlehlých záplavových oblastí a tím snad nejvýznamnějším faktorem bylo vyvinutí ligninu. Ten umožnil růst velkých stromů a pevnějších rostlin, schopných rozšiřovat se na rozsáhlá území. Lignin, který je i pro dnešní houby a bakterie náročné rozložit, byl krátce po svém vyvinutí patrně nepřekonatelnou výzvou. Místo, aby byl rozložen na

energii, byl nedotčený v ohromném množství ukládán a kyslík, jeho protiváha, zaplavil vzduch.

K takové souhře geologických náhod, jež by zvedly hladinu kyslíku, došlo ještě dvakrát, přičemž v obou případech mohlo jít o výsledek globálního zalednění zvaného doba tzv. sněhové koule. První výrazné zvýšení hladiny kyslíku asi před dvěma miliardami dvěma sty miliony let těsně následovalo po období geologických pochodů a globálního zalednění a i druhé období globálního zaledňování, trvající od doby před zhruba 800 miliony let do doby před 600 miliony let, patrně hladinu kyslíku navýšilo. Takové globální pohromy pravděpodobně narušily rovnováhu mezi fotosyntézou a respirací a mezi ukládáním a erozí. Jak obří ledovce tály a padal déšť, do oceánů se vmísily minerály a živiny (železo, dusičnany a fosfáty), které předtím led získal ze skal. V nich zapříčinily nebývalý rozkvět fotosyntetických řas a bakterií, podobný – i když byl mnohem rozsáhlejší – tomu, který dnes způsobují umělá hnojiva. Nejenže by taková záplava vyvolala růst, ale pak by také jeho plody začala pohřbívat: prach, špinavý led a štěrk by se vmísily do oceánů, hemžících se rychle se množícími bakteriemi, a ve výsledku by docházelo k ukládání uhlíku v dosud nevídaném měřítku. A spolu s ním by došlo i k trvalému zvýšení hladiny kyslíku.

Na okysličení naší planety je tedy cosi náhodného. Onen dojem umocňují ostatní, dlouhá a neměnná období. Před dvěma miliardami až jednou miliardou let – tedy v době, které geologové přezdírají „nudná miliarda“ – se nestalo nic pozoruhodnějšího. Hladina kyslíku tehdy zůstávala nízká a stabilní stejně jako během jiných, stovky milionů let dlouhých období. Jako by základním stavem byla stagnace, v níž jsou trvalé změny způsobovány geologickými proměnami. Podobné geologické faktory mohly působit i na dalších planetách, ovšem zdá se, že k dosahování souher náhod, díky nimž se kyslík může hromadit, je třeba pohybu tektonických desek a aktivní sopečné činnosti. Je možné, že se kdysi dávno fotosyntéza vyvinula i na Marsu, ale že tato malá planeta se svým smrskávajícím se vulkanickým jádrem ne-

mohla udržet v chodu geologické procesy nezbytné k nahromadění kyslíku a v celoplanetárním měřítku vydechla naposledy.

Ale je tu ještě druhý a důležitější důvod, proč fotosyntéza nemusí znamenat přítomnost kyslíkové atmosféry. Sama fotosyntéza se neobejde bez vody jako výchozí suroviny. Všichni známe tu podobu fotosyntézy, kterou vidíme všude kolem. Tráva, stromy, chaluhy – všechny fungují v zásadě stejně a uvolňují kyslík v procesu známém jako „kyslíková fotosyntéza“. Ale pokud o kousek ustoupíme a zaměříme se na bakterie, ukáže se mnoho dalších možností. Některé poměrně primitivní bakterie používají místo vody rozložené železo nebo sirovodík. Pokud nám využití takových materiálů připadá nepravděpodobné, je to jen proto, že jsme tak zvyklí na náš okysličený svět – produkt „kyslíkové fotosyntézy“ – že máme problém představit si podmínky, jaké na mladé Zemi panovaly v době vyvinutí fotosyntézy.

Je pro nás těžké pochopit i její nečekaný, avšak prostý mechanismus. Dovolte mi uvést příklad, o němž bych řekl, že snad až trochu přehnaně ilustruje její obecné chápání. Výrok má na svědomí Primo Levi a pochází z jeho skvělé knihy Periodická tabulka vydané v roce 1975 a v roce 2006 zvolené publikem (včetně mě samého) v Královské společnosti v Londýně „nejlepší populárně-vědeckou knihou všech dob“:

„Náš atom uhlíku vstupuje do listu a naráží do dalších nesčetných (ačkoli zde nevyužívaných) molekul dusíku a kyslíku. Přilne k velké a složité molekule, která jej aktivuje, a současně dostane jasným paprskem slunečního světla signál z nebe: v jediném okamžiku, jako hmyz lapený pavoukem, je oddělen od svého kyslíku, zkombinován s vodíkem a (jak se někteří domnívají) fosforem a konečně vložen do řetězce. Je jedno, jestli je ten řetězec dlouhý nebo krátký, ale je to řetězec života.“

Všimli jste si té chyby? Přesněji řečeno jsou tam hned dvě a Levi to mohl vědět, protože pravá chemická podoba fotosyntézy byla odhale-

Toto je pouze náhled elektronické knihy. Zakoupení její plné verze je možné v elektronickém obchodě společnosti eReading.