

edice **aliter** — svazek **72**

Addy
Pross

CO JE ŽIVOT?

Jak se chemie stává biologií

Argo a Dokořán 2020

Z anglického originálu *What is Life? How Chemistry becomes Biology* přeložil Pavel Pecháček.

What is Life? How Chemistry becomes Biology was originally published in English in 2012, second edition, as Oxford Landmark Science, in 2016. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Dokořán is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

© Addy Pross 2012, 2016

Translation © Pavel Pecháček, 2020

ISBN 978-80-7363-963-1 (Dokořán)

ISBN 978-80-257-3060-7 (Argo)

Nelle, Guyovi a Tamaře za to,
jakým směrem se můj život ubíral

OBSAH

Prolog	9
1 Živí tvorové jsou hrozně zvláštní	17
2 Hledání teorie života	47
3 Porozumět „porozumění“	57
4 Stabilita a nestabilita	73
5 Zapeklitý původ otázky života	97
6 Biologie a krize identity	125
7 Biologie je chemie	135
8 Co je život?	173
Epilog: Logika života	205
POZNÁMKY A LITERATURA	213
REJSTŘÍK	219

Prolog

„Strávil jsem odpoledne přemítáním o životě s velkým Ž. Život je hrozně zvláštní, když se nad tím zamyslíte! Tak odlišný od čehokoli jiného.“

P. G. WODEHOUSE

Cílem této knihy je vypořádat se se základními otázkami, jež lidstvo fascinují i souží po tisíce let, už od chvíle, kdy jsme se začali snažit lépe pochopit své místo ve vesmíru, tedy povahu živých bytostí a jejich vztah k neživému. Nalézt na tyto otázky odpovědi je nesmírně důležité – nedozvěděli bychom se totiž jen, kdo a co jsme, ale mělo by to dopad na naše chápání vesmíru jako celku. Byl kosmos vyladěn tak, aby podporoval život, jak naznačují příznivci takzvaného antropického principu? Anebo snad – bráno z koperníkovštějšího úhlu pohledu – „je lidstvo pouhým chemickým povlakem na planetě střední velikosti,“ jak prohlásil slavný fyzik Stephen Hawking? Těžko si představit větší ideovou propast.

Před 75 lety vydal proslulý fyzik Erwin Schrödinger knihu, jejíž chytlavý název *Co je život?* na tuto otázku přímo odkazoval. Schrödinger v samém úvodu napsal:

Jak lze události, jež se v prostoru a čase odehrávají v hranicích živého organismu, vysvětlit s přispěním fyziky a chemie?

Předběžnou odpověď ... bychom mohli shrnout následovně: Zjevná neschopnost dnešní fyziky a chemie objasnit tyto události není prázdným důvodem k pochybnostem, že se za pomoci těchto věd vysvětlit dají.

Uplynulo pětasedmdesát let, ale navzdory ohromným pokrokům, jež se během té doby udály v molekulární biologii a které provází dlouhý seznam Nobelových cen, zápasíme se Schrödingerovou jednoduchou a přímočarou otázkou dodnes. A že je to boj. Carl Woese, jeden z předních biologů 20. století, nedávno stav současné biologie dokonce prohlásil za srovnatelný se stavem fyziky na samém počátku 20. století, dříve než Albert Einstein, Niels Bohr, Erwin Schrödinger a další velcí fyzici vyvolali v oboru nefalšovanou revoluci – a dle Woeseho konečně nadešel čas na revoluci v biologii. Vskutku silné stanovisko! Stejně pozoruhodné je, že moderní biologie podle všeho šťastně bloumá na své současné mechanistické cestě a většina biologů je vůči hlasitému volání po přehodnocení lhostejná, nebo si jej ani neuvědomuje.

Ano, opravdu v současnosti jednoznačně víme, že neexistuje žádný *élan vital* neboli vitální síla, že živé organismy jsou tvořeny totožnými „mrtvými“ molekulami jako neživé věci, leč to, jak spolu tyto molekuly v holistickém souboru interagují, dává nějakým způsobem vzniknout něčemu naprosto mimořádnému – nám a všem ostatním živým tvorům na této planetě. Navzdory nesmírným pokrokům, kterých jsme v uplynulém půlstoletí dosáhli, paradoxně stále nechápeme, co to život je, jak se vztahuje k neživému světu a jak vznikl. V posledních padesáti letech bylo sice vynaloženo značné úsilí na zodpovězení těchto fundamentálních otázek, nicméně se zdá, že brána do země zaslíbené je nám vzdálenější než kdy dřív. Vytrácí se jako fata morgána v poušti, kde

se na horizontu zdánlivě zhmotní tetelící se palmy předznamenávající oázu, a naše žízeň po poznání zůstává neuhašená a touha po pochopení neukojená.

V čem tedy spočívá toto hluboce znepokojivé a přetrvávající dilema? Abychom podstatu problému vysvětlili co možná nejjednodušeji, podívejme se na následující hypotetický příběh: Jdete po poli a zničehonic narazíte na ledničku – plně funkční ledničku na poli, v níž je navíc několik dokonale vychlazených lahví piva. Jak by ale mohla lednice fungovat uprostřed pole? Očividně není připojená k žádnému vnějšímu zdroji energie, a přesto zůstává uvnitř chladná. A co tu vůbec dělá, jak se sem dostala? Podíváte se blíže a všimnete si, že má na vrchní straně solární panel připojený k baterii, jež udržuje v chodu kompresor, který ke svému fungování potřebují všechny ledničky. Takže záhada, *jak* lednice funguje, je vyřešena. Lednička zachytává sluneční energii pomocí fotovoltaického panelu. Zdrojem energie, která ji udržuje v chodu, je Slunce, jež umožňuje přečerpávat teplo z chladného prostředí do horkého – v opačném směru, než jak tomu je u tepelného toku běžně. Navzdory touze přírody vyrovnat teplotu uvnitř a vně lednice existuje u této fyzikální entity, již označujeme za „chladničku“, funkční design, díky němuž uchováváme jídlo a pití při patřičně nízké teplotě.

Ovšem záhada, jak se lednice dostala doprostřed pole, zůstává. Kdo ji tam dal? A proč? Když vám teď řeknu, že tu ledničku tam nikdo nedal – že k tomu došlo spontánně prostřednictvím přírodních sil, nebudete mi ani trochu věřit. Jak absurdní! Příroda takhle zkrátka nefunguje! Příroda spontánně nevytváří vysoce uspořádané účelné entity vzdálené od rovnovážného stavu – ledničky, auta, počítače a podobně. Tyto objekty jsou výtvoři lidského úmyslu, jsou účelné a promyšlené. Když už, příroda systémy posunuje

směřem k rovnováze, k nepořádku a chaosu, nikoli k řádu a funkci. Nebo snad ne?

Pravda je jednoduše taková, že nejelementárnější živá soustava – bakteriální buňka – je vysoce uspořádaným funkčním systémem, který má do rovnovážného stavu velmi daleko a jenž v termodynamickém smyslu napodobuje fungování ledničky, avšak jeho komplexita je o několik řádů vyšší! Lednička obnáší kooperativní interakci nanejvýš několika desítek dílů, kdežto bakteriální buňka vyžaduje interakci tisíců různých molekul a molekulárních agregátů, jež jsou někdy samy o sobě nesmírně složité, to vše v rámci soustavy tisíců synchronizovaných chemických reakcí. V případě ledničky je funkce zjevná – udržet pivo či jiný obsah v chladu odčerpáváním tepla z chladného vnitřku do teplejšího vnějšího prostředí. Jaká je však funkce bakteriální buňky s její uspořádanou komplexitou? Zde lze funkci ihned snadno rozpoznat sledováním jejího počínání. Stejně jako zjistíme úlohu a fungování ledničky prozkoumáním její činnosti, i funkci – nebo účel či smysl, chcete-li – buňky lze odhalit tak, že budeme sledovat, co dělá. A co uvidíme? Každá živá buňka je účinnou a vysoce uspořádanou továrnou, která je podobně jako kterákoli člověkem vytvořená továrna napojená na energetický zdroj a elektrický agregát, jež podporují její fungování. Jestliže se zdroj energie odpojí, provoz továrny se zastaví. Tato miniaturní jednotka přijímá surový materiál a s využitím elektřiny z elektrického agregátu ho přeměňuje na mnoho funkčních součástek, které jsou následně sestaveny tak, aby vytvořily výstup. A co je tím výstupem? Co ta velice propracovaná nanotovárna produkuje? Další buňky! Každá buňka je v podstatě vysoce uspořádaná a výkonná továrna na výrobu většího množství buněk! Biolog a nositel Nobelovy ceny Francois Jacob to

vyjádřil trošku poetičtěji: „Snem každé buňky je stát se dvěma buňkami.“

A právě to je problém se životem. Jako nám připadá absolutně nepravděpodobné, že by se samovolně sestavila lednička – skříň, chladič, kompresor, plyn – i kdyby všechny její součásti byly snadno k mání, jeví se nám jako nemyslitelná i pravděpodobnost spontánního vzniku vysoce uspořádané miniaturní chemické továrny, nanotovárny vzdálené od rovnovážného stavu. Nejen selský rozum nám říká, že vysoce uspořádané entity samovolně prostě nevznikají. Totéž kážou i jistá základní fyzikální pravidla – systémy tíhnou k chaosu a nepořádku, nikoli k řádu a funkci. Žádný div, že několika největším fyzikům 20. století, mezi něž patřil i Eugene Wigner, Niels Bohr a Erwin Schrödinger, připadala problematika života značně obtížná. Zdá se, že biologie a fyzika si vzájemně odporují a jsou zcela neslučitelné. Nikoho potom nepřekvapí, že zastánci inteligentního designu své zboží prodávají s takovým úspěchem!

Paradox neoddělitelně spjatý se samou existencí živé buňky má závažné důsledky. Znamená totiž, že otázka vzniku života není jen nějakou ezoterickou činností, která je zajímavá z historického hlediska a podobná snaze jedince rozkrýt vlastní rodokmen. Dokud nebude paradox vzniku života vyřešen, nepochopíme, co život je. Konečným důkazem, že jsme k tomuto porozumění dospěli, bude, že jej dokážeme přetvořit v ucelený návrh syntézy chemického systému, který bychom označili za „živý“.

Cílem naší knihy je tento fascinující námět znovu zvážit a ukázat, že teď už dokážeme nastínit obecné pravidlo, které je základem vzniku, existence a povahy všech živých bytostí. Budeme zde tvrdit, že díky nově vymezené oblasti chemie, kterou Günter von Kiedrowski nazývá „systémovou

chemií“, můžeme stávající propast mezi chemií a biologií překonat a že *ústřední biologické paradigma, darwinismus, je pouze biologickým projevem širšího fyzikálně-chemického popisu přírodních sil*. Tento vpravdě ambiciózní pokus spojit biologii s chemií se opírá o představu, že v přírodě existuje určitý druh stability, který byl dříve přehlížen a pro nějž zavedeme termín *dynamicko-kinetická stabilita*. Smísení této formy stability s darwinistickým pohledem na evoluci vede k obecné (či rozšířené) teorii evoluce, která postihuje jak biologické, tak pre-biologické systémy. Kupodivu už sám Darwin chápal, že pravděpodobně existuje obecný princip života. V dopisu Georgi Wallichovi roku 1882 napsal:

Patrně jsem někde prohlásil (ale nemohu příslušnou pasáž najít), že vzhledem k principu kontinuity se v budoucnu pravděpodobně ukáže být princip života součástí či důsledkem nějakého obecného pravidla...

Tato kniha je pokusem demonstrovat, že Charles Darwin se ve své genialitě a prozíravosti nemýlil a že nyní takovou teorii formulovat lze. Budeme se snažit ukázat, že chemie, věda, která sbližuje fyziku s biologií, dokáže na tyto fascinující otázky poskytnout odpovědi, třebaže do jisté míry neúplné. Doufejme, že lepším pochopením podstaty života se nedozvíme pouze, kdo a co jsme, ale že úplněji pronikneme do samotného jádra vesmíru a jeho nejelementárnějších zákonů.

Při psaní této knihy jsem těžil ze spolupráce a komunikace s mnoha lidmi. Poděkování si zaslouží především Jan Engberts, Joel Harp, Sijbren Otto a Leo Radom za zevrubné komentáře a výtky k první hrubé verzi knihy, Mitchell Guss, Gerald Joyce, Elio Mattia, Elinor a David O’Neillovi a Peter Strazewski za obecné připomínky a Gonen Ashkenasy, Stuart Kauffman, Günter von Kiedrowski, Ken Kraaijeveld, Puri

Lopezová-Garciaová, Meir Lahav, Michael Meijler, Kepa Ruiz-Mirazo, Robert Pascal, Eörs Szathmáry, Emmanuel Tannenbaum a Nathaniel Wagner za cenné diskuse, jež obohatily mé znalosti. Děkuji i své ženě Nelle za četné rozhovory, kritický pohled i postřehy, jež měly na text významný dopad. A závěrem jsem nesmírně zavázán i své editorce z Oxford University Press Lathe Menonové. Její hluboké porozumění vědě a pozoruhodné editorské schopnosti se postaraly o to, že text zbytečně nezabíhá do bouřlivých biologických vod, a výrazně přispěly k jeho výsledné podobě. Nicméně veškeré chyby samozřejmě padají jen na mou hlavu.

Živí tvorové jsou hrozně zvláštní

Živé a neživé entity se od sebe nesmírně liší, nicméně jak přesně se k sobě tyto dvě fyzické formy mají, zůstává vyzývavě mimo náš dosah. Obzvláště nápadným je v případě života jeho design, který zůstává zdrojem nekonečných spekulací. Jeho zjevná kreativita a preciznost je jednoduše působivá. Klasickým příkladem designérských schopností přírody je strukturální složitost oka, jež obsahuje duhovku, čočku schopnou měnit ohniskovou vzdálenost či světločivnou sítnici spojenou s optickým nervem, což umožňuje přenos informací. To je však jen špička designérského ledovce. Díky pokrokům na poli molekulární biologie jsme v posledních šedesáti letech zjistili, že designérské schopnosti přírody mohou být mnohem větší. Vezměme si třeba ribozom. Ribozom je drobná organela, která se v tisících kopiích nachází ve všech živých buňkách a vyrábí molekuly bílkovin, na nichž stojí veškerý život. V zásadě funguje jako vysoce uspořádaná a komplikovaná miniaturní továrna, která tyto bílkoviny (řetězovité molekuly) chrlí tak, že v řádu několika sekund sešívá dohromady ve správném pořadí stovky či více molekul aminokyselin. Tato neuvěřitelně výkonná entita je obsažena ve složité chemické struktuře, která má v průměru sotva 20–30 nanometrů – jen 2–3 miliontiny centimetru! Jen si to vezměte – celá továrna se všemi složkami, které byste v každém normálním provozu čekali, jenže v rámci

struktury tak nepatrné, že je pouhým okem zcela neviditelná. Za objasnění struktury a funkce této pozoruhodné organely obdrželi Ada Yonathová z izraelského Weizmannova institutu, Venkatraman Ramakrishnan z cambridgeské Laboratoře molekulární biologie a Thomas Steitz z Yaleovy univerzity v roce 2009 Nobelovu cenu za chemii.

O nic méně impozantní není ve srovnání s obdivuhodnými designérskými schopnostmi života ani jeho úchvatná rozmanitost, která je trvalým zdrojem inspirace. Rudé růže, žirafy, motýli, hadi, impozantní sekvoje, velryby, houby, krokodýli, švábi, komáři, korálové útesy – nad ohromnou a nekonečnou tvořivostí přírody zůstává rozum stát. Bez nadsázky miliony druhů, a to jsme se ještě ani nedotkli neviditelného bakteriálního království. Tato neviditelná říše je sama o sobě zdrojem nesmírné, takřka bezmezné rozmanitosti, kterou teprve začínáme objevovat. Design života a jeho rozmanitost jsou však jen dvěma vlastnostmi z širšího souboru, jenž dále prohlubuje záhadnost a jedinečnost fenoménu života. Některé charakteristické rysy života jsou tak ohromující, že není potřeba být nijak zvlášť všímavý, aby je člověk postřehl. Vezměme si kupříkladu nezávislou a účelnou povahu života. Té si prostě nelze nevěšimnout. Moje vnučka ji bezchybně zaznamenala, když jí byly teprve dva roky. Už tehdy si jasně uvědomovala rozdíl mezi skutečným psem a realisticky vypadající hračkou. Ráda si hrála s neživými psy, ale těch skutečných se bála, protože si nebyla jistá, s čím na ni přijdou. Velmi rychle se naučila, že chování hračky ve tvaru psa je předvídatelné, kdežto reálné zvíře má svou vlastní hlavu.

Existují však i jiné, na první pohled méně zjevné, byť pro laboratorní vědce velmi nápadné rysy života, které nás nadále dráždí a domáhají se vysvětlení. Pokud tedy chceme

pochopit, co je život, nejlepším začátkem bude zamyslet se nad vlastnostmi odlišujícími živé entity od neživých. Konec konců pochopení života po nás bude vyžadovat, abychom těmto unikátním vlastnostem porozuměli, a to nejen jim samotným, nýbrž i jejich původu. Uvidíme, že některé lze chápat z hlediska darwinismu, ačkoli o těchto vysvětleních dosud probíhá živá debata. Nicméně jiné takto uchopit neumíme a jejich podstata nás nepřestává trápit. Nepochybně soužily i velké fyziky 20. století, například Bohra, Schrödingera a Wignera. Zdá se totiž, že několik charakteristických rysů života podkopává nejzákladnější principy moderní vědy. Nad dalšími vlastnostmi někteří současní biologové zoufale lomí rukama. Jak jinak interpretovat nedávný popis života od Carla Woeseho: „Organismy jsou odolnými vzory v turbulentním proudění – vzory v energetickém toku.“¹ Tuto těžko uchopitelnou poznámku hraničící s mystikou pronesl jeden z předních molekulárních biologů 20. století – objevitel archeí, třetí domény života. Woeseho výrok znovu potvrzuje, jak problematická otázka života stále je.

Stojíme tedy před fascinujícím jevem: biologové – vědci, kteří se věnují studiu živých systémů – do hloubky rozumějí složitosti života a úspěšně prozkoumali mnohé z jeho klíčových součástí, přesto jsou i nadále na rozpacích, když mají zodpovědět, co život je. A o nic méně rozpačití nejsou ani fyzikové, kteří hluboce chápou nejfundamentálnější zákony přírody. Obě skupiny si do dnešního dne lámou hlavu s podstatou života a my můžeme pouze konstatovat, že tři tisíciletí stará záhada „co je život“ nebyla vyřešena. Začněme tedy svou objevitelskou cestu stručným zamyšlením nad každou z vlastností, díky nimž je život tak jedinečný, tak odlišný od neživé hmoty, a proberme, proč jsou tyto vlastnosti náramně podivné.

Uspořádaná složitost života

Živé bytosti jsou značně složité. Úplně první řádek klasické knihy Richarda Dawkinse *Slepý hodinář* dokonce zní: „My živočichové jsme nejsložitější známé věci ve vesmíru.“² Tento křiklavý řádek sám o sobě stačí na to, abychom si uvědomili, že živočichové musí být něco velice mimořádného. Co nás ovšem činí tak složitými, nebo komplexními, abychom použili vědecktějšího výrazu? A co termín „komplexní“ vůbec znamená? Riskujeme sice obvinění z vysvětlování kruhem, ale můžeme prohlásit, že samotný pojem „komplexita“ je komplexní, ne zcela jasně vymezený a mnohaleté úsilí jej kvantifikovat nebylo moc úspěšné, přinejmenším v souvislosti s biologií ne. Podívejme se proto na stěžejní aspekt komplexity, co se jejího vztahu k biologii týče, totiž na vysoce uspořádanou povahu živých věcí [v textu budeme dále používat i výrazy složitost či spletitost jako synonyma ke komplexitě].

Nalézt příklady komplexity v neživém světě je snadné. Tvar balvanu je nepochybně komplexní. Komplexita zde vyplývá z jeho nepravidelného tvaru. Přesný popis tvaru vyžaduje informaci – čím nepravidelnější je, tím více informací bude potřeba. Bylo by nutné nějak specifikovat fyzickou polohu každého bodu na povrchu kamene. Důležité ovšem je uvědomit si, že nepravidelnost kamene, tedy zdroj jeho komplexity, je *nahodilá*. Dotyčný kámen by mohl mít kterýkoli z nesčíslného množství jiných nepravidelných tvarů, a přesto by zůstal kamenem. Kámen z něj nedělá konkrétní nepravidelnost. Naproti tomu v živém světě není komplexita nahodilá, ale značně specifická. I nepatrná strukturální změna v uspořádané složitosti může mít dramatické následky. Kupříkladu jediná změna v sekvenci lidské DNA,