

Buněčná a evoluční teorie jsou dva pilíře současné biologie, zdá se však, že pouze druhá je předmětem pokračujícího výzkumu a diskusí. Buněčná teorie se považuje za uzavřenou kapitolu, za slavný, ale vyřešený problém v historii vědy. Důraz se dnes klade na experimentování s buňkami, nikoli na buněčnou teorii a není pochyb o tom, že jednou z největších výzev je experimentální objasnění mimořádné složitosti, která, jak se ukazuje, je pro buňku charakteristická. V různých fázích této knihy ale poznáme, že experimentální výsledky podněcují nové myšlenky, jež bude na jejím konci možno sloučit v nový buněčný model. Je tomu tak proto, že buňky nepředstavují pouze to, co vidíme v biologickém vzorku pod mikroskopem, nýbrž také to, co všechno vidíme lupou teorie. Vždyť buňka je systém a pochopení logiky systému vyžaduje, aby se o něm teoreticky uvažovalo. A protože tyto teoretické úvahy už mají za sebou dlouhou historii, začneme tím, že se znovu vydáme po stopách naznačené intelektuální pouti. Tato kapitola dokládá, že nám buněčnou koncepci vnukl mikroskop, neboť ze světónázoru klasické filozofie nebyla myslitelná. Po tomto průniku se uvedená koncepce pozvolna měnila a v průběhu těch proměn se měnil celý náš přístup k otázkám generačního (fylogenetického) a embryonálního (ontogenetického) vývoje. Líčená historická pouť ale nepostrádá překvapení, jež nás přivedou k představě, že veškeré definice života za posledních dvě stě let nejsou logicky výstižné. K představě, že se epigeneze nevyskytuje jen u embryí, nýbrž v každé jednotlivé buňce. Ke skutečnosti, že je fenotyp vždy složitější než genotyp. K tomu, že je epigeneze definující charakteristikou života.

Buněčná teorie

Představa, že se všichni živí tvorové skládají z buněk, změnila naše pojetí života víc než cokoli jiného a nadále je základem moderní biologie. Toto velkolepé zobecnění umožnil vynález mikroskopu, ale nedošlo k němu náhle. Šlo o vyvrcholení kolektivního výzkumu, jenž trval přes dvě stě let, a abychom mu porozuměli, museli jsme si uvědomit hlavní otázky, které je nezbytné řešit.

Začneme u mikroskopu. Proč jej potřebujeme? Proč buňky nedokážeme vidět pouhým okem? Protože sama oční sítnice sestává z buněk. Dva objekty lze odděleně vidět jen tehdy, dopadají-li od nich světelné paprsky na různé buňky sítnice, neboť dopadají-li na tutéž buňku, obdrží mozek pouze jediný signál. Ještě přesněji lze tento jev popsat tak, že mozek dokáže rozlišit dva objekty jen v tom případě, činí-li na sítnici vzdálenost jejich obrazů 150 mikrometrů (tisícin mm). Buňky mají průměrné rozměry (10 mikrometrů), daleko menší, než je tato mez, a proto se jejich obrazy, i když na předmět hledíme z velmi těsné blízkosti, překrývají, a zůstávají tedy neviditelné. Aby jejich vzdálenost na sítnici vzrostla, je nezbytné obrazy zvětšit, a právě zde vstupuje do hry mikroskop.

Pěti- až desetinásobné zvětšení lze získat s jedinou čočkou (tzv. jednoduchý mikroskop), to ale ke spatření buněk nestačí. Podstatně většího zvětšení dosahuje dvojočkový systém (složený mikroskop), a právě s jeho vynálezem

dochází ke zlomu. Prvními dvojočkovými optickými soustavami byly dalekohledy, z nichž vlastně nápad složeného mikroskopu vzešel. V roce 1610 sestavil Galileo z dalekohledu jeden z prvních složených mikroskopů o dvou čočkách a v roce 1611 popsal pravidla fungování nového přístroje Kepler.

Vynález mikroskopu vyvolal ve vědě velkou revoluci. Vedl k objevení zcela nového světa živých tvorů, kteří jsou prostým okem neviditelní, tzv. *mikroorganismů*. Mikroskopici 17. století byli první lidé, kteří spatřili bakterie, prvoky, krevní buňky, spermie a mnoho jiných *animalculae* a kteří si postupně uvědomili, že velcí tvorové viditelného světa jsou vlastně v přírodě minoritou. Mikroorganismy tvoří opravdu hlavní pevninu života a jejich objev změnil naše vnímání přírody v samé podstatě.

Mikroskopy ze 17. a 18. století měly bohužel podstatnou konstrukční vadu. Čočky vyrobené z jediného kusu skla nedokázaly všechny paprsky zaostřit do jednoho bodu, a proto jsou jejich obrazy nevyhnutelně ovlivněny odchylkami. Paprsky, které procházejí např. okrajem čočky, se neshíhají s těmi, jež procházejí střední částí, a vzniká tak *sférická odchylka*. Podobně se paprsky odlišné barvou (nebo frekvencemi) sbíhají v různých vzdálenostech od čočky za vzniku *chromatických odchylek*. Kvůli těmto odchylkám bylo možno vidět pouze izolované rostlinné buňky, které jsou odděleny tlustými celulózními stěnami, a nikoli už buňky v živočišných tkáních. Je tedy pravda, že lidé v těchto stoletích spatřili mnoho buněčných typů, jenže mikroskop ukazoval nejmenší jednotky u rostlin a ne u živočichů, a proto se na obecnou strukturu nedalo ani pomyslet.

Objev, že buňky existují ve všech organismech, vyžadoval nový typ mikroskopu, a ten přišel teprve v 19. století, kdy se odchylková překážka překonala zavedením *achromatických čoček*. Achromatické čočky jsou vyrobeny ze dvou či více částí, jejichž geometrické tvary a refrakční indexy jsou takové, že se odchylky jedné části přesně kompenzují ostatními. První achromatický mikroskop sestavil Giovanni Battista Amici v roce 1810 a s tímto novým přístrojem došlo k systematickému přehodnocování všeho, co už mikroskop odhalil v předešlých stoletích. Roku 1831 zjistil Robert Brown, že rostlinné buňky obsahují jakousi zakulacenou refrakční hmotu, a nazval ji *nucleus* (jádro). Uvnitř tohoto jádra bylo možno spatřit strukturu, jež lomila světlo ještě víc a která později vešla ve známost pod označením *nucleolus* (jadérko). V roce 1839 porovnali Matthias Schleiden a Theodor Schwann rostlinná embrya (jež postrádají tlusté celulózní stěny vyzrálých tkání) s embryi živočišnými a zjistili, že se jejich mikroskopické struktury nápadně podobají. Oba typy sestávají z jaderných buněk, a odtud závěr, že buňka je univerzální jednotkou živého světa. Tato představa zbožila staletí přetrvávající bariéru mezi rostlinami a živočichy a představuje první část buněčné teorie: *Vše živé sestává z buněk a z buněčných produktů*.

Každá nová myšlenka ale podněcuje nové otázky a v tomto případě se hlavní obtíž týkala mechanismu tvorby nových buněk, tématu, k němuž Schleiden a Schwann vypracovali návrh, který se ale ukázal jako mylný. Představovali si, že buňky vznikají procesem, jenž se jaksi podobá krystalovému růstu, a označili jej jako *samovolnou tvorbu*. Předpokládalo se, že dceřiné

buňky pocházejí ze zárodků či semen v jádru a že vyrůstají uvnitř mateřské buňky jako krystaly v nasyceném roztoku. Objev pravého procesu si vyžádal spoustu dalších let výzkumu a vzešel v podstatě z embryologických studií. V prvních vývojových stádiích jsou vidět všechny embryonální buňky a jak se jejich počet zvyšuje, lze vidět, že mají vždy jádro, jehož velikost a tvar se prakticky nemění. Znamená to, že buňky nikdy neprocházejí fází podobnou zárodečné, v níž by musely být menší než jádra, a tvoří se tudíž v procesu, jenž jejich základní strukturu zachovává beze změny, tj. procesem replikace. V roce 1852 jednoznačně zamítl představu *samovolné tvorby buněk* Robert Remak a učinil závěr: „*Buňky vždy pocházejí z dělení jiných buněk.*“ K témuž závěru dospěl v roce 1855 Rudolf Virchow při studiu mnoha normálních a patologických zralých tkání a své poznatky shrnul ve výroku: „*Omnis cellula est cellula.*“ Konečná verze buněčné teorie je tedy kombinací Schleidenovy a Schwannovy první teorie se závěrem, k němuž dospěli Remak a Virchow: „*Všichni živi tvorové se skládají z buněk a buněčných produktů a buňky se vždy množí dělením buněk jiných.*“

Otázka plození

V samém středu biologie existují dvě komplementární obtíže: *Jak organismus vytváří vajíčko?* (otázka vzniku) a *Jak vajíčko vytváří organismus?* (problém embryonálního vývoje, ontogenetický). O těchto otázkách se diskutuje už od antiky – především o nich psali Hippokratés a Aristotelés – teprve ale mikroskop v 19. století umožnil zásadní pozorování, která vedla k řešení. V souladu s buněčnou teorií se organismy staly buněčnými společenstvy a otázka po povstávání buněk se změnila ve snahu porozumět otázce, jaké buňky a kolik jich vytváří zárodek nového jedince. Botanici se domnívali, že každé semeno musí být oplodněno velkým množstvím pylových zrněk, a běžně se tradovalo, že čím je tento počet větší, tím odolnější bude výsledná rostlina. Totéž se uplatňovalo u živočichů, u nichž se opět mělo za to, že vajíčko musí oplodnit hodně spermií, z nichž každá nese zlomek dědičného materiálu, a to proto, že se *experimentem ukázalo*, že vajíčko při oplodnění vždy oklopuje mnoho spermií, z čehož vyplývalo, že není možné, aby veškeré dědičné vlastnosti těla nesla spermie jediná.

Tento problém vyřešil roku 1875 Oskar Hertwig. Při studiu mořských ježovek, živočichů, kteří se k mikroskopickým studiím vzhledem ke své průhlednosti zvláště hodí, si všiml, že vajíčka obsahují před oplodněním jednotlivá jádra a bezprostředně poté jsou dvojjaderná. Uvědomil si, že druhé jádro musí pocházet ze spermie, a tedy že vajíčko může oplodnit *jediná* spermie. Hertwigův objev dokončil v roce 1879 Hermann Fol, kterému se podařilo injikovat do jediného vajíčka více spermií. Zjistil, že vývoj je v takovém případě vždycky abnormální, čímž se prokázalo, že se oplodnění může a musí realizovat jedinou spermií.

Jednalo se však teprve o první krok. Představa, že je oplodnění vyvoláno splynutím spermie s vajíčkem, je významná, ale neřeší otázku vývojovou. Stále potřebujeme pochopit, proč jsou spermie s vajíčky jedinými buňkami,

kteří jsou schopny vytvořit nového jedince. Co jim propůjčuje takovou moc? Co je odlišuje od všech ostatních tělních buněk? Odpověď se opět dostavila z mikroskopických studií, nejprve však muselo dojít k rozvoji nových technik. Těmi rafinovanějšími vynálezy byly výkonnější mikroskopy (mikroskopy s větší rozlišovací schopností) a rozvoj barvicích technik. Barvivo eosin např. zbarvuje cytoplazmu růžově, kdežto hematoxylin barví jádro výrazně modře, a tak mikroskop s velkým rozlišením odhaluje, že se modré barvivo jádra koncentruje v samostatných těliscích, která dostala pojmenování *chromozomy* (zbarvená tělíska).

Tato nová technologie umožnila zjistit, že chromozomy podstupují v průběhu buněčného dělení, v procesu, který Walther Flemming nazval *mitózou*, nápadné konformační změny a elegantní přesuny (*tanec chromozomů*). Nejvýznamnějším objevem byl ale důkaz, že se během mitózy celý chromozomální soubor dělí na dvě identické části, jednu pro každou z dceřiných buněk, což výrazně naznačovalo, že chromozomy představují nositele dědičných znaků. V této fázi zbýval k sestavení skládanky vzniku jediný dílek a ten přišel s objevem Edouarda Van Benedena v roce 1883. Van Beneden zjistil, že skoro ve všech buňkách červa rodu *Ascaris* jsou čtyři chromozomy, zatímco v jeho pohlavních buňkách (*gametách*) jen dva. Proto konstatoval, že se mateřské i otcovské chromozomy v oplodněném vajíčku (*zygotě*) slučují, aby znovu vytvořily buňku s úplným souborem čtyř chromozomů. Van Beneden ale tyto údaje zveřejnil bez poznámek a ani si nepoložil otázku, proč ze všech buněk jediné gamety mají jen poloviční počet chromozomů. Význam Van Benedenova zjištění pochopil teprve v roce 1884 August Weismann a dospěl k závěru, že pohlavní buňky musí podstupovat velmi speciální způsob dělení, které jejich chromozomální počet rozdělí na poloviny, aby se splynutím obou gamet při oplodnění mohl znovu nastolit normální (*diploidní*) počet. Toto zvláštní dělení bylo pro odlišení od běžné mitózy nazváno *meiózou*: v roce 1890 poskytl experimentální realitu meiózy detailním popisem všech jejích fází Oskar Hertwig. To tedy odlišuje pohlavní buňky od všech ostatních a propůjčuje jim schopnost vytváření nového jedince: *pouze pohlavní buňky se dělí meioticky.*

Buňky, které se dělí jen mitoticky (a jsou tak předurčeny k zániku s tělem), nazval Weismann *buňkami somatickými* a ty, které se umějí dělit mitoticky i meioticky, označil za *buňky generativní*. Ty jsou potenciálně nesmrtelné, protože mohou mít potomky po určitý počet generací.

Objevy oplodnění, meiózy a zárodečných buněk nakonec umožnily poskytnout přesnou odpověď na otázku vzniku v buněčném pojetí: *Vznik nového jedince počíná dvěma meiózami za vzniku gamet a uskutečňuje se při oplodnění za vzniku zygoty.*

Otázka embryonálního vývoje

Nejelegantnější experiment v historii embryologie provedl před zhruba dvěma tisíci čtyřmi sty let Aristotelés. Otevíral vaječné skořápky s kuřecími zárodky v různých inkubačních dnech a pečlivě popisoval, co vidí: bílou skvrnu na

žloutku, která v samém počátku vyznačuje bod, v němž se budoucí embryo objeví; miniaturní hnědý žmolek, který začíná třetí den pulzovat a později se mění v srdce; nápadně zvětšené měchýřky, které se změní v oči; krevní cévy, které sestupují do žloutku a větví se jako kořeny; a tenkou blánu, která vše hájí jako plášť.

Na základě uvedených pozorování dospěl Aristotelés k závěru, že se orgány u vyvíjejícího se embrya nezvětšují jen co do velikosti, nýbrž také co do počtu. Podle Aristotela je embryonální vývoj *epigenezí*, řetězcem jednoho zrodu za druhým, při nichž se v rozmanitých stádiích objevují nové struktury a funkce. Stručně vyjádřeno, v průběhu embryonálního vývoje se *složitost systému neustále zvyšuje*.

Bezmála o dva tisíce let později, kolem roku 1660, zopakoval Aristotelův pokus Marcello Malpighi, ale s významným rozdílem. Byl první, kdo vývoj embrya sledoval pod mikroskopem, a to, co viděl, ho přivedlo k velmi odlišnému závěru. Oblast, v níž se mají objevit např. krevní cévy, se prostému oku jeví jako prázdná, ale pod mikroskopem je plná kapilár. Aristotelés konstatoval, že se krevní cévy objevují *ex novo*, ale podle Malpighiho ho oklamal vlastní zrak. Kdyby býval mohl použít mikroskop, zjistil by přítomnost organických struktur, jež jsou jinak neviditelné. Malpighi proto dospěl k názoru, že embryonální vývoj není *epigenezí*, nýbrž *preformací*, růstem forem, které už ve vajíčku předem existují.

Teorii preformace nadšeně přijali téměř všichni přírodovědci 17. a 18. století. Swammerdam, Leeuwenhoek, Leibniz, Réaumur, Spallanzani, Boerhaave, von Haller, Bonnet a mnozí další velcí vědci se prohlašovali za přesvědčené preformisty, a to nejen z experimentálních důvodů, nýbrž především z důvodů teoretických. Věděli sice o zákonech geometrické optiky a uvědomovali si, že jejich mikroskopy ovlivňují aberace, jenže o existenci živých tvorů neviditelných pouhým okem se diskutovat nedalo, a to vedlo k pozoruhodnému závěru. Velkou ideou preformistů byl princip, že *nekonečně malé je stejně reálné jako nekonečně velké*, což znamenalo, že živé struktury je vždy možno vysvětlit strukturami menšími. Protože ve fyzice a chemii neexistovala atomová teorie, byl tehdy takový závěr skutečně legitimní, ale znovu to byl mikroskop, co o jeho osudu rozhodlo.

Technologický rozvoj mikroskopie umožnil nakonec pozorovat ještě ranější vývojová stadia, a tak se stalo zřejmým, že se velmi nezralé embryonální struktury zcela liší od zralých. V roce 1828 publikoval Karl Ernst von Baer dílo *O vývoji živočichů*, monumentální embryologické pojednání, jímž jednou provždy skončily veškeré verze preformismu. Von Baer doložil, že u živočišných druhů existuje obecné vývojové stadium, v němž není embryo ničím víc než několika listy organické hmoty čili zárodečných vrstev (ektoderm, mezoderm a entoderm), a že rozvoj těchto základních struktur ukazuje, že embryonální vývoj není pouhým růstovým procesem, nýbrž také kontinuálním vznikáním nových tkání a řad trojrozměrných aktivit, jež výrazně transformují tvar embrya ve vývoji.

S příchodem buněčné teorie byl růst embrya vysvětlen jako sled buněčných dělení. Oplodněné vajíčko se mění ve dvě buňky, posléze ve čtyři, osm,

šestnáct, dvaatřicet, čtyřiašedesát atd. Při deseti děleních je počet buněk asi tisíc, při dvaceti milion, při třiceti miliarda, při čtyřiceti tisíc miliard atp. Na padesát tisíc miliard buněk dospělého člověka je třeba pouhých 45–46 buněčných dělení. Rozdíl mezi dospělým tělem a oplodněným vajíčkem není ale vůbec pouhou otázkou množství buněk. Padesát tisíc miliard vajíček, bez ohledu na jejich uspořádání v prostoru, by člověka nikdy nevytvořilo, a proto je zjevné, že se buňky v průběhu vývoje musí od oplodněného vajíčka *odlišovat*. Embryonální vývoj tedy provází hierarchie diferenciačních procesů (které u člověka vytvářejí přes dvě stě buněčných typů).

Během tohoto vývoje podstupují navíc zevní tvar a vnitřní anatomie embrya četné proměny ještě předtím, než lze začít rozpoznávat důvěrně známé znaky dospělého života. Tyto změny podněcují přesuny, tubulace, vchlípnování a vrásnění mnoha druhů, jež jsou známy pod souhrnným označením *morfogeneze*. Krátce vyjádřeno, objevy buněčného růstu, histologické diferenciace a morfogeneze přesně odpověděly na otázku embryonálního vývoje v buněčném pojetí: *Embryonální vývoj představuje pravou epigenezí a sestává ze tří základních pochodů: z růstu, diferenciace a morfogeneze*.

Dvě verze buněčné teorie

Velcí antičtí filozofové se vzájemnými rozpravami propracovali k řadě světových názorů, např. k atomové teorii, determinismu a indeterminismu nebo relativitě a evoluci, a přesto žádný nedospěl k buněčné teorii, což nás nutí k zamyšlení proč. Z konceptuálního hlediska se fakt, že neměli mikroskop, nezdá jako rozhodující. Ani atomy nelze vidět, a přece k explicitní formulaci atomové teorie došlo. Otázka proto zní následovně: *Proč dokázali lidé ve starověku uvažovat o atomech, nikoli však o buňkách?* Myšlenku, že hmotu lze rozdělit na částice, naznačují četné skutečnosti z každodenního života: dům se skládá z cihel, poušť je z pískových zrn, dešťové kapky se mohou změnit v řeku atd. Proč nedodat, že organismy sestávají z drobných organismů?

Je tomu tak proto, že se lidé ve starověku ocitli před nepřekonatelnou překážkou, neboť zkušenosti ukazují, že matka je vždy větší než zárodek z ní zrozený. Život na Zemi tedy musí pocházet shora, nikoli zdola, od vyššího Bytí – od Boha či Matky Přírody – a ne z malých nicotných mikrobů. V této situaci posloužil mikroskop naprosto nezbytně k tomu, aby nás přiměl spatřit buňky, aby nám jejich existenci vnutil, protože bez tohoto vynucení by v ně náš rozum nebyl schopen uvěřit. V historii myšlení je buněčná teorie určitě jednou z největších revolucí, možná ze všech největší, třebaže lze dodnes zaslechnout názor, že se o pravou vědeckou teorii nejedná, protože má ryze popisnou povahu. Podle tohoto názoru je tato teorie pouhým záznamem empirického faktu, že se vše živé skládá z buněk a že se každá buňka odvozuje od již existující.

Ve skutečnosti je tomu tak proto, že lze buněčnou teorii vyjádřit buď ve *slabé*, anebo v *silné* verzi. Formuluje-li se tvrzením, že *všechny nám známé živé organismy sestávají z buněk*, je ji možno opravdu zredukovat na pouhý popis života. V této verzi nemá teorie prediktivní sílu a žádný usvědčitelně

živý následek. Existuje však rovněž silná verze, která reprezentuje skutečné a ze lži usvědčitelné zobecnění těchto empirických faktů, a tedy pravou vědeckou teorii. Jde o konstatování, že z buněk sestávají všechny možné živé organismy.

První verze je pouhým připuštěním existence buněk, přinejmenším na naší planetě. Druhá uvádí, že buňky představují základní komponenty všech životních forem včetně mimozemského a umělého života. Konstatuje, že buňky jsou logickými jednotkami živého světa, stejně jako jsou atomy jednotkami světa fyzikálního. Silná verze buněčné teorie jinými slovy vyjadřuje, že život bez buněk neexistuje, a představuje tudíž samu definici života: *Život je stav aktivity buněk a buněčných systémů.*

Sama prvotní otázka biologie *Co je život?* se tedy mění v otázku *Co je buňka?* Abychom však na ni odpověděli, je nezbytné, abychom si zrekapitulovali odpovědi na otázku, která se kladla v minulosti: *Co je živý organismus?*

Mechanistická filozofie

Pro tvrzení, že moderní biologie vynikla v Evropě v první polovině 17. století, existují přinejmenším dva důvody. Prvním je objev nového světa mikroorganismů a druhým formulace prvního velkého paradigmatu v biologii, totiž myšlenka, že každý živý organismus je stroj. Tuto koncepci – známou jako *mechanistická filozofie* – formuloval René Descartes, její nejvýraznější obhájce, ve skutečnosti však byla výsledkem kolektivního myšlenkového souběhu učenců z mnoha evropských měst. Od antiky až do konce renesance se stroje sestavovaly z čistě praktického důvodu, v 17. století však toto pojetí rozšířily dvě zásadní novinky.

V prvním případě šlo o to, že se na stroj začalo pohlížet nejen jako na prostředek k přeměně světa, nýbrž také jako na pomůcku k jeho studiu. K tomu, aby člověk nahlédl do mikroskopu a přijal realitu mikroorganismů, musí především v to, co vidí, uvěřit, nabýt přesvědčení, že přístroj nevytváří optickou iluzi (jak se občas tvrdilo), nýbrž že odhaluje struktury, které existují v reálném světě. Druhou novinkou ze 17. století je skutečnost, že se stroje stávají nejen pomocníkem poznání, ale také přímo jeho *modelem*. Vznikla představa, že k pochopení lidského těla je nezbytné rozebrat je na části a studovat funkci jeho menších komponent, podobně, jako to děláme se stroji.

„Zdravý člověk se podobá bezvadně jdoucím hodinám, kdežto nemocný připomíná hodiny, které je třeba opravit.“ Tento Descartesův výrok je dokonalým souhrnem mechanistiky, jež podnítila radikální proměnu medicíny. Anatomie přestala mít čistě popisnou úlohu a posunula se k fyziologii s patologií. Lékař se už nemusel opírat o knihy Hippokratovy a Galénovy. Mohl teď stavět na zkušenostech podobně jako každý dobrý mechanik. Mechanistická revoluce se hluboce vryla do každé stránky evropského myšlení. Dokonce i představa o Bohu se změnila, a tak se Všemohoucí změnil v Nejvyššího Mechanika, tvůrce zákonů, které ovládají „stroj“ vesmíru. Tato představa podnítila úplné oddělení ducha a hmoty a svůj nejvyšší výraz nalezla v Descartesově

dualismu, rozdílu mezi *res cogitans* a *res extensa*, tj. v naprostém rozchodu ducha s tělem. Byl to počátek novověké filozofie.

Tvrdívá se (a je to pravděpodobné), že žádná kulturní revoluce nemůže být náhlá akce. Nutně jí musí předcházet dlouhé inkubační období, snad na nepravděpodobných místech a dílem nezodpovědných aktérů. V našem případě se mnozí historici domnívají, že se kulturní proměna směrem k mechanistice objevila v prvních stoletích křesťanské éry a pěstovala se v klášterech. Ve světě, který se stále víc a víc hroutil, šlo o jediná místa, kde se zbytky civilizace zachovávaly při životě bořením mostů s vnějškem a pak soužitím v soběstačných komunitách. Na takových místech představovala ale ekonomická nezávislost pouhý prostředek k duchovnímu životu, a tak se – aby bylo možno čas ubíraný dřinou zasvětit modlitbám a rozjímání – začaly vyrábět stroje.

Stroje už nebyly strůjcem dřiny, nýbrž strůjcem svobody, byly Božím darem, a proto začalo být důležité jim rozumět, zdokonalovat je a sestrojovat nové. Strojovou kulturu zvláště podporovala benediktinská opatství, postupně však začala přesahovat jejich zdi, šířila se do sousedních městských společenstev a vstupovala do dílen řemeslníků a umělců. Nakonec zaklepala i na dveře univerzit.

Ať už se v těchto stoletích odehrávalo cokoli, faktem je, že se s počátkem 17. století začal objevovat nový typ stroje. Nesloužil žádnému praktickému účelu a využíval se jen k demonstraci teoretických principů (typickým příkladem byla nakloněná rovina, kterou Galileo sestavil, aby tak ilustroval zákony pohybu). V 18. století se navíc objevily stroje, které byly ještě neúčinnější a bizarnější, mezi nimi např. mechanická kachna Jacquese de Vaucansona (která třepala křídly, káchala, krmila se a vyměšovala umělý trus) anebo „Spisovatel“ Pierra Jacquet-Droze, automat, který si uměl smočít pero v kalamáři, odstříknout inkoust a napsat Descartesovu frázi *Cogito ergo sum* (obr. 1.1). Tyto stroje se zjevně stavěly pro zábavu a bylo snadné si je splést s hračkami, ve skutečnosti ale představovaly dobu naší počítačové, umělé inteligence. Stroje, které ohlašovaly novou filozofii odzbrojujícími prostředky utopie.

Chemický stroj

Mechanistická představa přírody se v 17. století šířila Evropou velmi rychle, ale nikoli bez konfliktu. Odpor přicházel prakticky ze všech stran a byl zuřivý. Kromě záporného postoje aristotelských akademiků se tu právě zvolna vynořovala z temnoty alchymie jakási nová věda, která lidské tělo pokládala v podstatě za sídlo chemických reakcí. Dědicové alchymie se sice rozhodli zanechat magie, ale zcela postrádali zájem smířit se s „mechanistickým“ pojetím přírody, a tak Georg Ernst Stahl (1659–1731), jeden ze zakladatelů chemie, vmetl mechanistice do tváře otevřenou výzvu. Jeho teze spočívala v tvrzení, že organismy stroji být nemohou, protože vlastní zvláštní sílu, *vis vitalis*, která se v anorganickém světě nevyskytuje. Stahl, jenž jako první objasnil rozdíl mezi organickou a anorganickou chemií, čelil mechanistické teorii třemi argumenty:



1. Protože anorganická hmota postrádá *vis vitalis*, nikdy nebude možno syntetizovat organické látky v laboratoři.

2. Tím, co se v živých organismech odehrává, je skutečná transmutace látek, a nikoli pohyb kol, řemenů a převodů.

3. Živé organismy nemohou být stroji, protože stroje netrpí.

První námitka podnítila dlouhou řadu experimentů se syntézou organických látek *in vitro* a byla pompézně vyvrácena v roce 1828, kdy Friedrich Woehler dosáhl syntézy močoviny v laboratoři. Stojí za zmínku, že se cítil být očitým svědkem *velké tragédie vědy, popravdy krásné hypotézy ošklivým faktem* (což dokládá, že první vitalisté – zcela odlišně od svých po-

zdějších následovníků – úplně přijali princip experimentální falzifikace).

Druhá Stahlova námitka měla silnější základ a přiměla mechanisty k přehodnocení samé definice *živého stroje*. Názor, že organismy jsou mechanické stroje, se během 18. století v podstatě změnil v představu, že jde o *stroje chemické*. Tato hladká změna perspektivy změnil v představu, že jde o *stroje* svého stroje, zařízení, jež k produkci mechanického pohybu využívá chemických reakcí spalování. Právě parní stroj svedl obě učené dohromady a mechanisté s vitalisty si uvědomili, že chemický stroj neznamenaá rozpor v pojetích, jak se mínilo, nýbrž skutečnost.

Třetí Stahlova námitka, myšlenka, že stroje netrpí, nebyla překonána nikdy a i dnes je hlavní překážkou na cestě k umělému životu. Descartes napsal, že trpí pouze lidé, protože jen oni vlastní duši, zatímco zvířata bolestné výrazy jen *napodobují*, ale těch, kdo takový výstřelek brali vážně, bylo jen málo. Začínalo tedy být stále jasnější, že organismus nemůže být použitým mechanickým strojem, a koncepce chemického stroje byla nakonec přijata všeobecně.

V 19. století se studium parního stroje vyšvihlo až na nejvyšší úroveň teoretického formalismu, který vyvrcholil objevem prvních dvou termodynamických zákonů: principu, že se energie netvoří ani neničí, a principu, že míra neuspořádanosti (či *entropie*) jakéhokoli uzavřeného systému stále narůstá. Zvláště dramatický dopad měl druhý princip, který zřejmě odhalil ne-

Obr. 1.1

„Spisovatel“, kterého vyrobil v polovině 18. století švýcarský vynálezce Pierre Jaquet-Droz, představuje krásný automat, jenž sedí za stolem, namáčí pero do kalamáře, odšťákuje přebytečný inkoust a zapisuje Descartesův slavný výrok „*Cogito ergo sum*“. Je nainstalován plně funkční a vlastní jej muzeum v Neuchâtelu.

zjednodušitelný rozdíl mezi fyzikou a biologií. V každém uzavřeném fyzikálním systému se míra neuspořádanosti neustále zvyšuje, kdežto živé organismy si svůj vlastní vnitřní řád nejen uchovávají, nýbrž jej ještě zvyšují. Standardní odpověď, že organismy nejsou uzavřené, ale otevřené systémy, je malou útechou, protože je nutno pochopit, *jak* svůj vysoce organizovaný stav zvládají udržovat. Nakonec se ale odpověď našla a vzešla ze dvou hypotéz:

1. Živé organismy musí neustále vyměňovat hmotu a energii s okolním prostředím (představa o *neustálém biologickém pohybu*).

2. Vnitřní uspořádanost organismů se zachovává proto, že se neuspořádanost vytvářená jejich chemickými reakcemi neustále odčerpává do okolí.

Jinými slovy, aby organismy setrvaly naživu, musí se nacházet v neustále aktivním stavu (jejich buňky pracují dokonce, i když organismus spí) a stále musí odčerpávat přebytečnou entropii ze svých reakcí. Řečeno s Erwinem Schrödingerem (1944): konzumují nejen hmotu, ale rovněž uspořádanost. Ke konci 19. století se na organismus vlastně pohlíželo jako na *termodynamický stroj*, tj. jako na chemický stroj, který musí vykazovat neustálou aktivitu, aby těmto termodynamickým větám vyhovoval.

Počítačový model

Koncem 18. století, právě v době, kdy kritika ze strany chemiků ustupovala, povstala vůči mechanistice další opozice a dala průchod nové verzi vitalismu. Hnutí započalo spontánní, téměř instinktivní reakcí biologů na skutečnou absurditu, kterou mechanisté hodlali biologii vnutit. Jednalo se o revoltu proti preformismu, proti představě, že jsou dospělé struktury již předem dány v jakémsi *homunkulovi* v oplodněném vajíčku. Roku 1764 poslal velkou výzvu preformismu Charles Bonnet: „*Nejsou-li organizovaná tělesa již předem zformována, pak se musí každodenně formovat podle zákonů jakési speciální mechaniky. A nyní se vás snažně táži, jaký to mechanismus předsedá mozku, srdci, plicím a tolika dalším orgánům?*“

Výzva byla jasná a aby se biologové preformismu vyhnuli, byli nuceni konstatovat, že *formativní síla* požadovaná Bonnetem, jež by vysvětlovala embryonální vývoj, existovat musí. Šlo spíše o jakousi embryonální než o chemickou sílu, velice blízkou Aristotelovu *vnitřnímu plánu*, ale také se označovala za *vis vitalis*. Preformismus, jak už jsme poznali, byl definitivně opuštěn v roce 1828 na základě monumentálního von Baerova pojednání, které dokazovalo, že embryonální vývoj je pravou epigenezí, jak už tvrdil Aristotelés, tj. vytvářením nových struktur a nikoli prostým růstem struktur předem existujících. Mechanisté museli znovu přiznat, že k objasnění reality embryonálního vývoje je nutno koncepci „živého stroje“ modifikovat, ale tentokrát se úsilí o řešení ukázalo jako mnohem obtížnější a po celé období 19. století se tato vitalistická víra zdála být nepřekonatelnou.

Odpověď se dostavila teprve s genetikou, přesněji s objevem, že život není dán pouze hmotou a energií, nýbrž také *informací*. V roce 1909 vymezil Wilhelm Johannsen ostrý rozdíl mezi viditelnou částí jakéhokoli organismu

(fenotyp) a částí, která nese dědičné instrukce (genotyp), a prohlásil, že živá bytost není monádním, nýbrž duálním systémem, diarchií, stvořením, které je výsledkem integrace dvou vzájemně se doplňujících skutečností. Johannsenovo poselství se bohužel ignorovalo nebo nechápalo a teprve počítač s rozdílem v *hardwaru* a *softwaru* změnil fenotyp/genotypovou dualitu v pochopitelnou a populární koncepci.

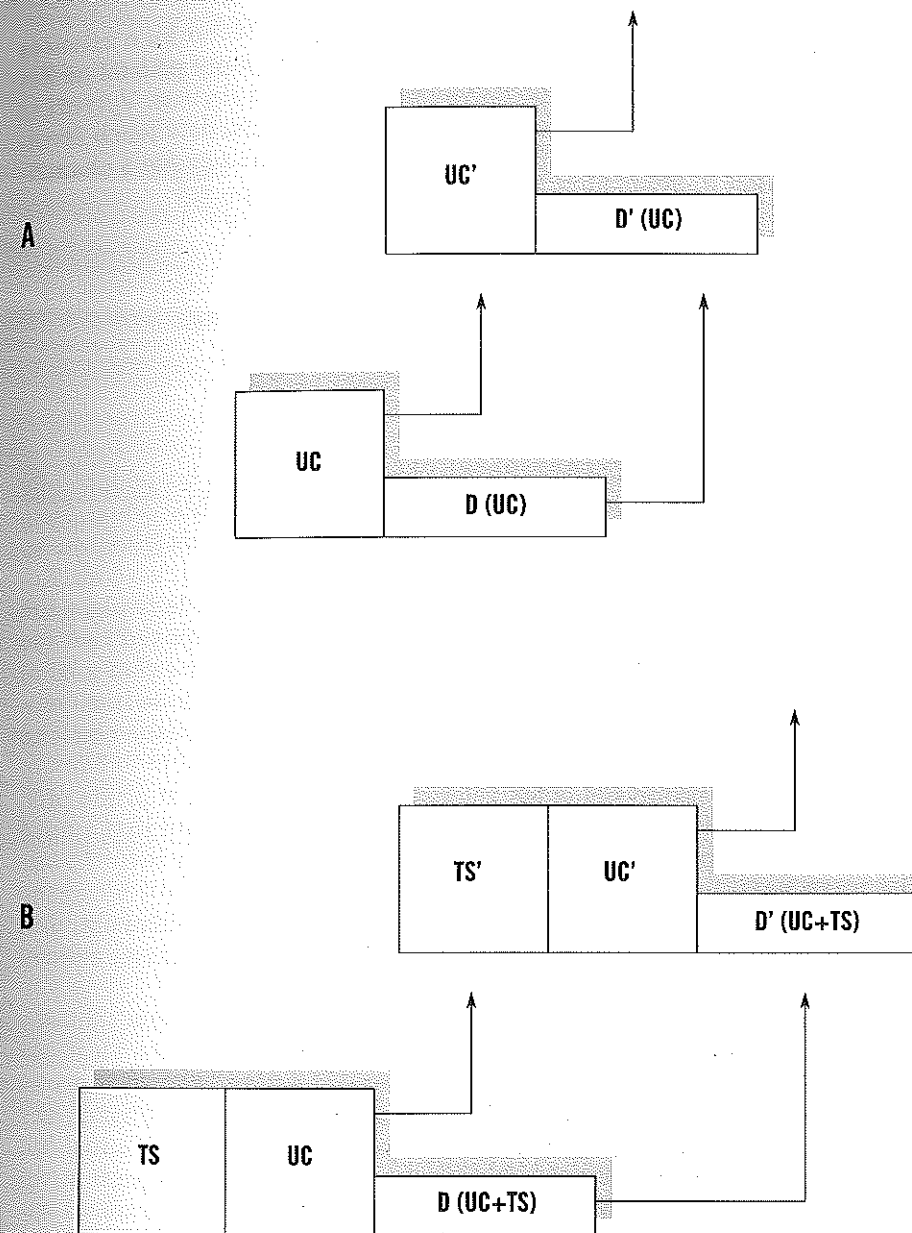
Podstatné je, že genotyp – jakýsi biosoftware – představuje depozitář instrukcí, a je tedy potenciálně schopen nést plán embryonálního vývoje. Jednalo se o odpověď, na kterou vitalismus dlouho čekal, a proto se stal počítač novým modelovým mechanismem. Nový model živého stroje není ve skutečnosti počítačem, s nímž se setkáváme v běžném životě, nýbrž ideálním strojem známým jako *von Neumannův autoreplikátor*.

John von Neumann, jeden ze zakladatelů kybernetiky (to on vynalezl centrální procesorovou jednotku), si položil otázku, zda lze sestavit automat, který je schopen výstavby jiného automatu (*univerzální konstruktér*), a zvláště automatu, který vytváří vlastní kopie (*autoreplikační stroj*). Jeho rozsáhlý příspěvek doložil, že *teoreticky* takové stroje možné jsou (obr. 1.2). Ve skutečnosti nebyl von Neumannův autoreplikátor kvůli složitosti nikdy postaven (vyžaduje přes 200 000 komponent), ale důkazy o tom, že by se zkonstruovat *dal*, vedou k závěru, že to možné je, a tedy je prokázáno, že stroj je schopen replikace (Marchal, 1998). Tyto závěry oznámil von Neumann v roce 1948 a jeho práce podnítila zcela nové výzkumné pole, které se už dnes dělí ve vědní obory, jež známe pod souhrnným označením *umělý život*. Paralelním, ale jiným polem je obor *umělé inteligence*, a proto je důležité je odlišovat. Obor umělé inteligence se zabývá znaky, které se v reálném životě objevily v závěru evoluce, zatímco umělý život simuluje vše, co se objevilo na počátku (Sipper, 1998; Tempesti *et al.*, 1988). Na poli umělého života jsme dnes na úrovni, jíž organický život dosáhl asi před čtyřmi miliardami let, v období tzv. prapolevky, zajímavé však je, že bychom se mohli stát svědky původu této nové životní formy na vlastní oči. Jde o poslední baštu, o hranici, za kterou by se sen mohl realizovat.

Autopoietická buňka

Umělý život je zcela novým přístupem k fundamentálním otázkám biologie, protože nám umožňuje studovat život naprosto jinak, tj. konstruováním strojů, které mají některé jeho vlastnosti. Je ale nutno zdůraznit, že život na bázi křemíku se od života na uhlíkové bázi zcela liší, neboť umělé molekuly a umělé buňky sestávají z elektronických obvodů, a jsou tedy bytostmi dvojnásobně definovány. Proto biologové neopouštějí ani tradičnější přístupy a pátrání po správné definici života se nezastavuje. Významný krok vpřed na tomto poli učinili v roce 1974 Francisco Varela, Humberto Maturana a Ricardo Uribe studií, která do biologie uvedla koncepci *autopoiesis*.

* Těžko posoudit, jak to autor myslí. (Pozn. lektora.)



Obr. 1.2
Von Neumannův autoreplikační stroj.
Univerzální konstruktér UC může využívat vlastního popisu $D(UC)$ k sestavě vlastní kopie UC' a jejího popisu $D'(UC)$.
Univerzální konstruktér UC může zahrnovat univerzální počítač, např. Turingův stroj (TS), a vytvářet kopii celého systému podle jeho popisu $D(UC + TS)$.

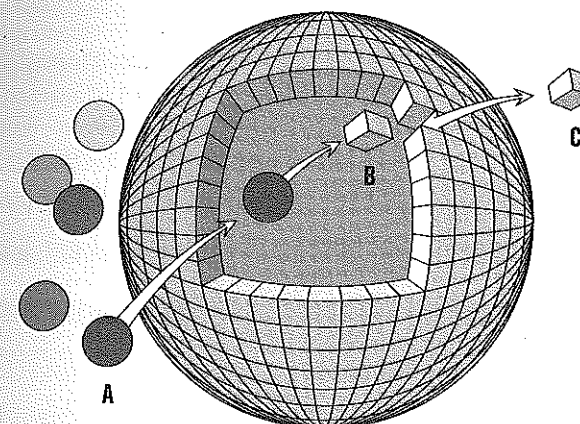
Pro ilustraci své představy použili Varela a Maturana báhorku o zeleném mužíkovi z Marsu (použitou už Alexandrem Oparinem), který přiletěl na Zemi a chce zjistit, jaký druh života se na naší planetě vyskytuje. Vytvoří si dlouhý výčet pozemských objektů, ale protože si není moc jistý jejich životností, požádá o pomoc hospodáře. Hospodář pohlédne na seznam a okamžitě položky rozdělí do dvou sloupců, živé vlevo, neživé vpravo:

člověk	rozhlas
strom	auto
houba	počítač
mula	robot
slepice	Měsíc
korál	přiliv

Zelený mužik je takovou ukázkou jistoty ohromen a požádá hospodáře, aby mu řekl, podle které vlastnosti dokázal živé položky tak rychle vybrat. Hospodář zvolí nahodile dvě položky – mulu a slepici – a prohlásí, že jsou živé, protože se dovedou *pohybovat*, to ale zeleného mužika nepřesvědčí. Korál a strom se přece nepohybují, a živé určitě jsou. Hospodář tedy okamžitě navrhuje *dráždivost* či *schopnost reagovat na podněty*, ale odpověď zase nesedí. Ano, mula a slepice na bodnutí špendlíkem reagují, ale strom a korál zůstávají lhostejné. Hospodář tedy vykřikne *Reprodukce!*, jenže se hned musí opravit, protože mula rozmnožování schopna není. A přece jsou oba jeho sloupce naprosto správné. Jenže proč? O čem to ví, aniž by si to uvědomoval? Potřebuje si to promyslet, a tak zeleného mužika požádá, ať přijde příští den. Potom se dá do přemýšlení. Stromy ztrácejí na podzim listy a nové z nich vyrůstají zjara. Podobně je tomu se zvířecí srstí: vyrůstá zevnitř. Hospodář ví, že bude-li hladovět, tělo mu zeslábne a zhubne, jakmile ale začne zase jíst, jeho růst se vrátí k normálu. Vždy se tedy jedná o vnitřní aktivitu, která tělo udržuje při růstu. Už je mu celá věc jasná a je připraven zelenému mužíkovi odpovědět.

Všechny předměty z pravého sloupce – rádio, auto atd. – nejsou schopny vlastní obnovy, zatímco ty z levého jsou živé právě proto, že tuto vlastnost mají. Teď už je zelený mužik spokojený a souhlasí s ním. Protože je druhá termodynamická věta známa už i na Marsu, zelený mužik ví, že k tomu, aby byl živý, musí organismus vykazovat nepřetržitou aktivitu. Tělo musí být nejen schopno vlastní obnovy, když se v něm něco zničí – musí se renovovat neustále, musí své vlastní struktury nepřetržitě bourat a zase znovu budovat, tj. musí být schopno permanentní *sebetvorby* či *autopoiese*.

Varela a Maturana dodávají, že autopoiese musí být vlastností každého živého systému včetně jeho nejmenších jednotek, což znamená, že kteroukoli buňku lze reprezentovat schématem, jež ilustruje její neustálou transformaci vnější hmoty v buněčné komponenty (obr. 1.3). Rovná-li se tvorba rozpadu, nachází se buňka v rovnovážném stavu (*sebeúdržba, sebezáchova*); je-li produkce vyšší než destrukce, buňka roste a nakonec se dělí ve dvě (*autoreprodukce*). Varela a Maturana tak dospěli k definici živého systému obecně



Obr. 1.3
Autopoietická buňka. V tomto zjednodušeném schématu se molekuly z vnějšího prostředí (A) transformují v buněčné komponenty (B), zatímco transformované produkty rozpadu (C) se vylučují. Když se míra produkce rovná míře degradace, buňka se nachází ve stabilním stavu. Přesahuje-li tvorba rozklad, buňka roste a posléze se dělí na dvě.

a buňky zvlášť: *Fyzikální systém je živý, je-li schopen transformovat tok ze vnější hmoty a energie ve vnitřní tok sebeúdržby a autoreprodukce.*

Tato definice, jak jsme už poznali, je automatickým důsledkem druhé termodynamické věty, a *autopoietický* stroj tedy představuje inovovanou verzi koncepce *termodynamického stroje* z 19. století. Jedná se opravdu o nejobecnější definici života?

Epigenetická buňka

Jedním z největších úspěchů 20. století byl objev, že informaci genu určuje pořadí jeho nukleotidů, podobně jako informace slova odpovídá pořadí jeho písmen.* V obou případech koresponduje informace s lineárním pořadím základních jednotek. Genetická informace je tedy *lineární* kvantitou, ale funkci proteinů určuje uspořádání aminokyselin v prostoru, tj. jejich trojrozměrná informace. Všechny informace, které se následně objevují v proteinech, očividně nepřenášejí geny. Odkud pak chybějící informace pocházejí?

Příroda tento problém vyřešila jednoduše i mimořádně. Lineární informace nukleotidů se využívá k sestavě lineárního pořadí aminokyselin. Polypeptidový řetězec se potom sám dále skládá (díky elektrickým silám, které existují mezi aminokyselinami) a spontánně na sebe bere trojrozměrnou strukturu. Jako by člověk napsal slovo *jablko* a pak sledoval, jak se to slovo dál sestavuje a mění ve skutečné jablko. Informační rozdíl mezi lineárním pořadím nukleotidů a trojrozměrným pořádkem proteinů lze ilustrovat jednoduchým příkladem. Lineární sled sta aminokyselin je dán stovkou souřadnic, kdežto jejich trojrozměrné uspořádání vyžaduje tři sta souřadnic (tři

* Tato věta předpokládá, že slova „se skládají“ z písmen, což je předpoklad dosti podivný. Také dále není jasné, co se myslí „informací“. (Pozn. lektora.)

pro každou aminokyselinu). Proteinové skládání či samosestavování obnáší tedy přidavek dvou set chybějících souřadnic ke stovce, kterou poskytují samy geny. A protože je složitost systému dána počtem parametrů, kterých je třeba k jeho popisu, je jasné, že proteinové skládání je jevem, jenž produkuje *nárůst složitosti*.

Jak jsme viděli, při embryonálním vývoji se pojmu epigeneze užívá k vyjádření nárůstu složitosti, k níž v rostoucím embryu dochází, tento termín je však možný u každého konvergentního nárůstu složitosti, a proto lze konstatovat, že proteinové skládání představuje příklad *molekulární epigeneze*. Trojrozměrné informace o proteinu „vyvstávají“ během skládání právě tak jako „vyvstávají“ vlastnosti vody z vhodné kombinace vodíkových a kyslíkových atomů.

Skládání lineárních polypeptidů v trojrozměrné proteiny je ale teprve první z dlouhé řady sestavovacích pochodů. Po zformování se některé proteiny sestavují ve větší komplexy a ty opět dávají vzniknout vyšším strukturám. Nesmírné množství informací, které je uloženo v trojrozměrné buněčné struktuře, povstává tedy z jakéhosi řetězce sestav, a proto jsou všechny tyto procesy epigenetické nejen proto, že k nim dochází po expresi genů, nýbrž také proto, že se nové vlastnosti vynořují ve stadiích, která nápadně připomínají způsob, jakým se novinky objevují při vývoji embrya. Buněčná struktura je nakonec výsledkem transkripce genů a řady odlišných typů sestav, jež celkově představují pravou *buněčnou epigenezi*. Na počátku všech těchto kroků je neodmyslitelně genetická informace, ale trojrozměrná informace buňky je daleko větší a téměř úplně odpovídá nárůstu složitosti vytvářenému buněčnou epigenezí. Třebaže to může vypadat zvláštně, *epigeneze* mezi vlastnostmi, jež už byly navrženy k definici živého systému (dědičnost, metabolismus, reprodukce, homeostáza, adaptabilita, autopoiese atp.), *nebyla zmíněna nikdy* (viz Dodatek).

Možným vysvětlením je, že teoreticky (ale jen teoreticky) bychom se bez ní mohli obejít. Kdyby genotyp obsahoval *úplný* popis fenotypu, nebylo by zapotřebí nárůstu složitosti ani buněčné epigeneze, jako je tomu u všech našich strojů, od mechanických hodin po von Neumannův automat. Příroda si ale osvojila úplně jinou strategii. Ani u nejjednodušší bakterie neobsahuje genom úplný popis buňky, nýbrž pouze lineární informace o jejích polypeptidech, z nichž každý nabývá trojrozměrné formy sestavovacím procesem, který v genech zapsán není. Jedná se o ohromný rozdíl mezi buňkou a strojem. Žádný uměle vytvořený stroj není schopen zvyšovat vlastní složitost, a právě proto je buněčná epigeneze právě tím kvalitativním rozdílem, který živou buňku odlišuje od každého známého stroje. Tuto podstatnou vlastnost nemůže pomíjet žádná patřičná definice buňky, a musí ji tedy uvádět *explicitně*. Tak dospíváme k nové definici buňky, kterou lze vyjádřit několika způsoby:

1. Buňka je autopoietický systém, jehož trojrozměrné struktury vznikají v konstrukčních procesech, které zvyšují její složitost.
2. Buňka je autopoietický systém, v němž je fenotyp složitější než genotyp.
3. Buňka je autopoietický a epigenetický systém.

Shrňme, že nárůst složitosti je definiční vlastností života. Vyjadřuje novou definici života, která nám – jak dále uvidíme – umožní odhalit v podstatě života novou logiku.

2

evoluční teorie