

///// tematická studie / thematic article //////////////////////////////////////

FILOSOFICKÉ PROBLÉMY NANOTECHNOLOGIÍ: ONTOLOGICKO-SYSTÉMOVÁ VÝCHODISKA A ETICKÉ IMPLIKACE

Abstrakt: Z pozice filosofie vědy a techniky se nejprve zabýváme otázkou, co znamenají nanotechnologie v rámci evoluce technologií. Jejich mimořádný význam primárně vidíme v tom, že jsou technologiemi samotného života. Dále vysvětlujeme, že nanouroveň je doménou, kde se kříží zákonitosti kvantové a klasické newtonovské fyziky. Z této pozice vycházíme při hledání odpovědi na otázku, za jakých podmínek mění zmenšování věci také jejich funkční podstatu. Na příkladu debaty Drexler vs. Smalley demonstrujeme paradigmatickou nesouměřitelnost obou perspektiv a fyzikálně-chemické a inženýrské limity nanotechnologií. Zvažujeme, nakolik jsou reálná nebezpečí a etické implikace vycházející z Drexlerových úvah, ať už se jedná o tzv. „grey goo“ problém nebo molekulární výrobu. Jako závažnější hodnotíme vybrané problémy spojené se syntetickou biologií. Text zakončujeme úvahou, že pro lidskou civilizaci by mělo být existenční výzvou přemýšlet o možnostech nanotechnologií k rozvíjení života.

Klíčová slova: etika; molekulární výroba; nanotechnologie; ontologie; syntetická biologie

VÍT BARTOŠ

Katedra filosofie

Technická univerzita v Liberci
Studentská 1402/2, 461 17 Liberec
email / vit.bartos@tul.cz

Philosophical Issues of Nanotechnologies: Ontological- Systemic Starting Points and Ethical Implications


Abstract: From the perspective of philosophy of science and technologies, we firstly attend to the issue of the role of nanotechnologies within the evolution of technologies. We recognize their utmost importance in the respect that they are technologies of life itself. We further explain that the nano-level is the domain of intersection of the rules of quantum physics and traditional Newtonian physics. This is our starting point from which we discuss the issue of conditions under which minimizing things also changes their functional essence. We use the example of the Drexler vs. Smalley debate to demonstrate the paradigmatic incomparability of the two perspectives and the physical-chemical and engineering-related limits of nanotechnologies. We discuss to what extent are the dangers and ethical implications emerging from Drexler's contemplations real, be it what he calls the "grey goo" problem or the issues of molecular production. We regard certain problems linked to synthetic biology as more serious. We conclude our text with the consideration that the human civilization should think of the possibilities of nanotechnologies in the development of life as an existential challenge.


Keywords: ethics; molecular manufacturing; nanotechnology; ontology; synthetic biology

MICHAL TRČKA

Katedra filosofie

Technická univerzita v Liberci
Studentská 1402/2, 461 17 Liberec
email / michal.trcka@tul.cz

 0000-0003-4846-7630

 Toto dílo podléhá licenci Creative Commons Attribution 4.0 International.

Tato studie je jedním z výsledků projektu TL04000023 Podpora pro etické rozhodování v oblasti výzkumu a vývoje nanotechnologií. Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu ÉTA

1. Úvod

Nanotechnologie jsou součástí probíhající vědecko-technické revoluce, a to nejen na úrovni základního výzkumu, ale také v oblasti nejrůznějších aplikací od domény strojírenství přes chemický průmysl až třeba ke zdravotnictví. Mnohé z těchto aplikací přitom znamenají doslova revoluční technologickou změnu. Řada výzkumů se navíc pohybuje na úrovni základních biologických procesů stejně jako přírodní nanotechnologie, například nanostroje jako ribozomy, které na velikostní škále nanometrů formují živou hmotu. Vzhledem k mimořádnému významu, který nanotechnologie mají a budou mít, dává smysl se ptát po jejich širším společenském rozměru. V rámci filosofie techniky existuje tento základní problém: co nového do světa přináší technické artefakty, co znamená technika z hlediska ontologie? Z tohoto hlediska je možné zkoumat základní strukturální rozdíly mezi technickými artefakty a na druhé straně zejména biologickými systémy.¹ Poptávka po tomto tématu je zřejmá zejména v souvislosti s uvědoměním si faktu, že technosféra a svět přírody mohou být inkompatibilní. Nanotechnologie v tomto ohledu představují speciální případ obecnějšího principu. Druhá perspektiva základní ontologické problematiky techniky se táže, jak se strukturálně mění lidské vnímání, prožívání a hodnocení světa, díky existenci moderní techniky. Toto téma se navíc silně prolíná s etickou problematikou filosofie techniky. A na tyto základní problémy filosofie techniky se právě zaměřuje tento text.

V první části s pomocí myšlenkového experimentu ukazujeme, proč je v rámci evoluce dosavadních technologií oblast výzkumu a vývoje nanotechnologií podle nás zcela mimořádnou. V dalších dvou částech, nejprve z širší historické perspektivy a následně skrze reflexi výzkumného programu fyzika Richarda Feynmana, přemýšlíme nad tím, kam nás vedou úvahy a poznatky o doméně mikro/nanosvěta, a jak odpovídají na otázku, za jakých podmínek mění zmenšování věci také její funkční podstatu. Čtvrtá část textu je zaměřena na Drexler–Smalley debatu o nanotechnologiích, která představuje příklad paradigmatické nesouměřitelnosti mezi linií vedoucí od Richarda Feynmana po Erica Drexlera, která zastává mechanisticko-inženýrské pojetí nanotechnologií, a táborem chemiků, jakými jsou Richard Smalley nebo George Whitesides, kteří kritizují toto pojetí a poukazují

¹ K těmto dvěma perspektivám viz např. John T. Bonner, *Na velikosti záleží* (Praha: Mladá fronta, 2008); Fritjof Capra, *Tkáč života* (Praha: Academia, 2004); Gerald Edelman, *Second Nature* (New Haven: Yale University Press, 2007); Murray Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar* (New York: Holt Paperback, 1994).

na fyzikálně-chemické a inženýrské limity nanotechnologií. Oba přístupy mají své specifické implikace rovněž v oblasti etické problematiky. Nejprve se tedy věnujeme možnostem molekulární výroby, o které hovoří Drexler, a poté etickým implikacím syntetické biologie, která nepřímo koresponduje s možnostmi, o kterých přemýšlí Smalley.

V našich úvahách primárně vycházíme z metodologických východisek *filosofie vědy a techniky*. Náš přístup má přitom blízko k moderní analytické filosofii techniky (*philosophy of technology*),² zabývající se významem technologie, jejími etickými rozměry a dalšími dopady na společnost, v mnohém navazující na starší filosofii vědy³ a zároveň provázanou se studii vědy a technologií (*science and technology studies*). V oblasti etických reflexí nám jde obecně o aplikovanou etiku – tedy aplikaci obecných teorií, konceptů, metod na specifické otázky etiky technologií, konkrétně nanotechnologií, ať už se jedná o etický rozměr designu nanotechnologií nebo rizik spojených s jejich masovějšími aplikacemi.⁴

2. Evoluce techniky – panoramatický pohled

Člověk je jistě *homo faber*,⁵ tvořivou bytostí, v planetárním měřítku. I když musíme připustit, že vlastně všechno živé je aktivní, produktivní a tvořivé,

² Viz např. přehled Jan Kyrre Berg Olsen, Stig Andur Pedersen, and Vincent F. Hendricks, eds., *A Companion to Philosophy of Technology* (Oxford: Blackwell, 2009).

³ Viz např. Philip Kitcher, *The Ethical Project* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2011).

⁴ Viz např. Deb Bennett-Woods, *Nanotechnology: Ethics and Society* (London: Taylor & Francis Group, 2008); Fritz Allhoff, Patrick Lin, James H. Moor, and John Weckert, eds., *Nanoethics: The Ethical and Social Implications of Nanotechnology* (Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007).

⁵ Jedna z námitek, která byla vznesena recenzentem, zdá se, zpochybňuje naše pojetí člověka jakožto *homo faber*. K tomu bychom chtěli říci následující: Netvrdíme, že člověk je *pouze* *homo faber*, tvrdíme, že je *mimo jiné* *homo faber*. V kontextu naší úvahy jsme ale potřebovali přijmout a zdůraznit tuto zjednodušující premisu. Její filosofické zdůvodnění může být nicméně poměrně komplexní a dovolávat se spousty tradic. Chtěli bychom být ovšem aktuální. Například Daniel Dennett ve své koncepci logiky evoluce intencionálního postoje mluví o tzv. „gregoryovských tvorech“, což jsou tvorové, kteří dokázali spustit pozitivně zpětnovazební proces, který integruje interní reprezentace organismu s jejich praktickou realizací v externím světě (nástroje zejména). Tím se říká, že tyto nejspělejší organismy tvoří a vylepšují sami sebe radikálně v interakci s okolním světem, který se stává z části jejich výtvořem a tím také částí jejich těla a myslí. V jiné formulaci zas David Chalmers a Andy Clark hovoří o tzv. „extended mind“ hypotéze, která zdůrazňuje fakt, že kognitivní procesy jsou úzce svázány s externími fakty – a ještě spíše artefakty –, které jsou nutnou a konstitutivní podmínkou těchto kognitivních procesů. V zásadě lze zobecnit tento typ externalismu tak, že pro vyspělé

zdá se, že lidské bytosti v mnoha ohledech vystoupily z mezí tvořivosti dosavadního života na této planetě, což vlastně nejnázorněji předvádějí současné vesmírné technologie, protože právě ty nás zavedly za hranice „umweltu“ jakéhokoliv jiného živého tvora.

Podle celé řady tradičních filosofických formulací člověk tvoří univerzálně a intencionálně či teleologicky, zatímco živá i neživá příroda staví své struktury spontánně, bezcílně a partikulárně. To jsou ovšem jen velmi schématické formulace. Proto posuneme perspektivu a zaměříme se na to, co by mohlo být chápáno jako milník v evoluci dosavadních technologií.

Tuto posunutou perspektivu můžeme nasimulovat myšlenkovým experimentem, který je, jako většina myšlenkových experimentů, poměrně problematický (implicitně předpokládá „verbálně“ možnou fyziku, která ovšem fakticky nemusí být vůbec možná), ale v jistém ohledu může být alespoň metodologicky instruktivní:

Představme si, že supervyspělá vesmírná (super)inteligence pozoruje různá „zajímavé“ planety ve vesmíru a mezi nimi i tu naši, Zemi.⁶ Tato supervyspělá inteligence, která samozřejmě posuzuje věci z hlediska vlastní sofistikované perspektivy,⁷ bude pozorovat evoluci/e i civilizaci/e z hlediska

organismy (a člověk v tomto zdaleka převyšuje vše, co známe z této planety) platí čím dál více to, že externí svět, jenž je do značné míry formován jejich chováním, zpětně funguje jako podpora jejich univerzálnějšího jednání a sebe-realizace. Toto „vtělování“ (*embodiment*) chápeme jako specifickou ontologickou událost, která ospravedlňuje konstruktivní zjednodušení v chápání člověka právě jako homo faber. Je ale jasné, že se tím ani zdaleka nevyčerpává problematika efektivní a dostatečné definice člověka. Homo faber je stále jen dílčí určení – pro naše účely zde v tomto textu ale podstatné a užitečné. Srov. Daniel Dennett, *Druhy myslí* (Praha: Academia 2004), 96–97; nebo Andy Clark and David Chalmers, „The Extended Mind,“ *Analysis* 58, no. 1. (1998): 7–19.

⁶ Co zde znamená „zajímavý“, jaká jsou kritéria zajímavosti? Pokud uplatníme v podstatě banální úvahu vycházející z antropocentrické perspektivy (což je vždycky nepřekročitelný problém), pak řádově je zajímavé to, co je zajímavé pro lidské mozky (ne pro psy, šimpanze, bakterie, nebo arteficiální systémy typu počítačů či robotů na dosavadní technologické úrovni). Kdybychom my, lidé, mohli lépe zkoumat okolní vesmír (exoplanety s potenciálním odlišným životem například), zajímaly by nás podle našeho soudu dvě věci: 1) historie a komplexita systémů přítomných na těchto planetách; 2) práce těchto systémů s energetickými zdroji (jako my uvažujeme např. v termínech tzv. Kardašovovy škály). Tyto dva body jsou v naší úvaze prozatím přibližnými kritérii pro to, co v tomto kontextu považujeme za „zajímavé“.

⁷ Ale protože je vyspělá, nemá problémy porozumět i perspektívám nižším, podobně jako my se snažíme porozumět jiným druhům na naší planetě. Při skutečně vysokém stupni vývoje taková superinteligence nemusí mít nutné problémy s hermeneutikou, filosofií dějin, a ani s takovými zapeklítořmi, jako naznačuje klasická Nagelova otázka „jaké je to být netopýrem?“. Zde se samozřejmě použijeme na tenký led – uvažovat o superinteligenci a jejich hodnotách může být zcela analogicky (pokud ne vlastně identicky!) nesmyslné, jako uvažovat o boží

ohromných časových škál a bude také rozumět klíčovým vývojovým okamžikům zkoumaných systémů (v našem referenčním rámci by to mohly být strukturně důležité fylogenetické změny a procesy v průběhu biologické evoluce – třeba vznik eukaryot či proces encefalizace apod.; v rámci kulturní evoluce by se superinteligentní pozorovatelé zaměřili na technologický progres v úzkém smyslu slova či na vývoj umění nebo na stupeň dosahování sociální koheze globalizujících se civilizací apod.).

Klademe si otázku, jaké milníky v evoluci dosavadních technologií by tato vesmírná superintelligence hodnotila jako opravdové milníky, jako nutné momenty, kterými se naše stále ještě nevyvinutá civilizace pomalu (a možná nejistě) posouvá k úrovni onoho vesmírného supervyspělého pozorovatele. Právě v tomto kontextu se také chceme zabývat otázkou, *co znamenají nanotechnologie v rámci evoluce technologií*, nebo jinými slovy, co by si asi vesmírní pozorovatelé řekli o pozorovaném subjektu, který se vyvinul na tu úroveň, že umí cíleně manipulovat s jednotlivými atomy a molekulami a hodlá na nich vybudovat jistý typ pokročilé industrie.

Nejprve jedna metodologická poznámka: Když ještě chvíli zůstaneme u našeho myšlenkového experimentu a podmínek jeho smysluplnosti, je zřejmé, že předpokládá minimálně to, že naše současná fyzika alespoň z části souhlasí s mnohem vyspělejší fyzikou oněch supervyspělých pozorovatelů. Kdyby tomu tak nebylo, nemohli bychom se shodnout ani na koncepci rozvrstvení (škálování: mikrosvět, mezosvět, makrosvět) fyzikální reality, a tedy ani na kritériích pro hodnocení pokroku v pochopení a praktickém využití těchto dílčích domén fyzikální reality. Nemohli bychom srovnávat a nemohli bychom obecně tvrdit nic systematického o evoluci technologické vyspělosti nějaké civilizace či inteligentního pozorovatele vesmíru. Shoda na principiálních koncepcích fyziky (termodynamika, relativita, kvantová fyzika) je nutným předpokladem možnosti srovnání a hodnocení ve stylu „Tato civilizace již dosáhla úrovně xyz ve zvládnání potenciálních fyzikálních zdrojů či domén, protože již umí operovat ve fyzikální doméně abc“.

Z tohoto hlediska je, doufáme, docela srozumitelná velmi zjednodušená formulace koncepce evoluce lidských technologií,⁸ jako postup od mechanických nástrojů a strojů jakožto více či méně bezprostředních rozšíření funkcí tělesných končetin přes tepelné stroje (pohánějící tato mechanická

perspektivě. V jistém ohledu by tedy bylo možno proti předchozím úvahám argumentovat analogicky k tradičnímu argumentu negativní teologie. Klást meze představivosti ovšem není nikdy dobré.

⁸ Zatím jen z hlediska jednoho jednoduchého kritéria: využívání zdrojů energie.

soukolí) založené na kinetické energii atomů a molekul až k technologiím jaderným operujícím na úrovni jader atomů či s technologiemi založenými na elektromagnetickém záření (jakožto zdroje energie). Z hlediska *kvantitativního využívání zdrojů energie* zde vidíme jistý zřejmý pokrok, který vyjadřuje přechod od zvládnání (praktického i konceptuálního) světa rozměrů relevantních pro lidské tělesné prožívání okolního světa ke světům na mikroúrovni a na makroúrovni. Když to ještě více filosoficky zobecníme, stáváme se díky pokročilým technologiím ontologicky univerzálnějšími, protože prostě operujeme na mnoha úrovních či škálách fyzikální reality.

Jenže přirozeně nejde pouze o prosté využívání zdrojů na úrovních různých fyzikálních domén. Jde také o řízení, kontrolování, adaptování, budování či *přeuspořádávání procesů na těchto rozmanitých úrovních*, což je věc velice odlišná. Jinak řečeno, je tu také *kvalitativní aspekt* technologické evoluce. Zde by se asi naši vesmírní pozorovatelé soustředili na komplexitu našich výtvorů, na to, jak jsou tyto výtvořiny kompatibilní, či jak konstruktivně uchovávají a alternují celou řadu procesů, které vznikly spontánním vývojem (třeba evolucí skrze přirozený výběr) a které jsou ve vesmíru neuvěřitelně vzácné (život), protože jsou prostě a jednoduše složitě.

To nás tu přivádí k přijetí a explicitnímu formulování principu, který možná zní triviálně, ale podle našeho soudu by mohl vyjadřovat dobré kritérium, kterým lze posuzovat vyspělost technologie a nepřímo i vyzrálost celé civilizace. Princip by mohl znít nějak takto: Stupeň vyspělosti technologie z hlediska kvalitativního aspektu nechť je vyjadřován mírou schopnosti dané technologie odolávat působení druhého termodynamického zákona v dané fyzikální doméně, anebo dokonce přispívat ke komplexitě této domény. A asi bychom měli ještě doplnit rozšiřující princip, že v případě rozhodovací konfliktní situace (kterou doménu máme udržovat a rozvíjet spíše než jinou) dáváme přednost rozvoji té nekomplexnější (nám) známé domény reality.

Předchozí formulace působí možná abstraktně, ale vyjadřuje velice jednoduchou ideu. Nám známý vesmír je velmi mrtvé místo, kde vládne II. termodynamický zákon a kde jsou připouštěny jen drobné fluktuace v uspořádanosti. Zakladatel kybernetiky Norbert Wiener situaci vyjádřil takto:

V systému, který není v rovnovážném stavu, nebo v částech takového systému nemusí entropie vzrůstat. Může se fakticky v určitých místech snižovat. Možná, že tento nerovnovážený stav vnějšího světa je pouze určitým stadiem v sestupném směru, který nakonec povede k rovnovážnému stavu. Dříve nebo později

zemřeme a je velmi pravděpodobné, že celý vesmír kolem nás zajde na tepelnou smrt tím, že svět bude uveden do jediného obrovitého stavu tepelné rovnováhy, v němž se již nic skutečně nového nemůže přihodit. Nezbude tu nic jiného než jednotvárná uniformita, od níž lze očekávat pouze menší a zanedbatelné místní fluktuace.⁹

Bylo by tedy, alespoň dle našeho soudu, přirozené, kdyby ultimátní hodnotou (principem) vyspělé civilizace bylo vzdorování entropické tendenci a kde technologie všeho druhu mají hrát zásadní roli v této snaze.¹⁰ Je také zřejmé, že živé struktury jsou anti-entropické, vysoce vzácné a nejsložitější známé entity v pozorovatelném vesmíru. Technologie, která je *alespoň teoreticky* schopna rozvíjet doménu, jež je vlastní životu v jeho základní struktuře (uhlíkaté polymery), je z tohoto kvalitativního hlediska potenciálně nejvyspělejší technologií a dobrý vnější (superinteligentní) pozorovatel by ji tedy měl vnímat jako revoluční krok v evoluci technologií.

Pokud přijmete předchozí premisy či perspektivu (myšlenkový experiment) a pojem „nanotechnologie“ uchopíte dostatečně široce, pak už vám nic nebrání k tomu, abyste připustili, že nanotechnologie mohou znamenat úplně novou situaci pro lidstvo. Situaci, která má potenciálně hluboké praktické i teoretické důsledky.

Nechceme tu ovšem rozhodně tvrdit, že nanotechnologie nemohou mít (nebo v normativních termínech, že „by neměly mít“) ještě jiné velice praktické funkce, jako je vylepšování známých materiálů či hlubší miniaturizace známých nástrojů a strojů, které jsme doposud vyvinuli. To je určitě jeden z praktických cílů. Na jisté filosofické rovině abstrakce je tu ale skutečně nejpodstatnější to, že nanotechnologie a jejich vývoj je fundamentálně motivován základními životními procesy zvláště uvnitř reálných buněk. Harvardský chemik George Whitesides základní program výzkumu formuloval dost jasně:

První věcí je vzít existující nanostroje – právě ty, které jsou v buňkách – a poúčit se u nich. [...] Druhou věcí je začít přímo od základu a nezávisle vyvíjet nové typy nanosystémů. [...] Bude to úžasná výzva pokusit se zjistit, zda jsme

⁹ Norbert Wiener, *Kybernetika a společnost* (Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1963), 43.

¹⁰ To, že se děje pravý opak – ekologická devastace přírody a rozklad kulturní rozmanitosti díky globalizaci – je skutečně hlubokým paradoxem civilizace, která si dobře uvědomuje právě formulovanou myšlenku.

schopni překonat (*outdesign*) evoluci. Bylo by ohromujícím výsledkem, kdyby se nám podařilo napodobit nejjednodušší živou buňku.¹¹

A to není nic jiného než vědecký projekt dnes nazývaný „syntetická biologie“.¹² Nanotechnologie jako součást syntetické biologie v tomto smyslu jsou a mohou být technologiemi samotného života. Uzavřeme: Z toho vyplývá, že nanotechnologie mohou znamenat ontologicky, axiologicky i eticky radikálně novou etapu pro lidstvo, protože jsou potenciálně technologiemi samotného života.

3. Kouzlo mikro/nanosvěta – vztah velkého a malého z historické perspektivy

Básník William Blake vyjádřil projekci makrosvěta (makro-rozměrů) do našeho světa (mezo-rozměrů) následujícím slavným veršem:¹³

Svět v zrníčku písku rozeznat
a nebe v divoké květině,
bezmezný prostor do vlastních dlaní brát
a věčnost prožít jen v hodině.

Gottfried Wilhelm Leibniz zas ve své *Monadologii* v 66.–70. tezi zdůraznil moderně řečeno fraktálovou strukturu vesmíru, kde se jedna úroveň reality projektuje do úrovně nižší a tak až do nekonečna (dle Leibnize):

Z toho je vidět, že i v nejmenší částě hmoty existuje svět tvorů, živých bytostí, živočichů. [...] Každý kus hmoty může být chápán jako zahrada plná rostlin nebo rybník plný ryb. Ale každý výhonek rostliny, každý úd živočicha, každá kapka jeho šťáv je opět taková zahrada nebo takový rybník.¹⁴

V těchto z moderního hlediska naivních, leč romantických a esteticky působivých představách se zračí některé důležité metafyzické intuice, které dnes již považujeme za banální, přičemž některé ale za banálně zcela nesprávné. Zaměříme se na některé tyto intuice, které vyjadřují základní

¹¹ George M. Whitesides, „The Once and Future Nanomachine,“ *Scientific American*, no. 9 (2001): 78–84.

¹² Srov. Martyn Amos, *Na úsvitu živých strojů* (Praha: Mladá fronta, 2007), 278.

¹³ William Blake, „Prorockví nevinnosti,“ in *William Blake: Pisnický nevinnosti a zkušenosti?* (Praha: BB art, 2001), 93.

¹⁴ Gottfried Wilhelm Leibniz, *Monadologie* (Praha: Svoboda, 1982), 168.

záhadu vztahu makrosvěta a mikrosvěta, abychom problém viděli z širší historické perspektivy a zároveň dostatečně obecně.

Myslím, že dnes již můžeme jen těžko docenit vhled prvních presokratických filosofů (zejména tzv. mladších fyziků, obzvláště atomistů), kteří si uvědomili, že svět je mereologicky rozčleněn a že „mikrosvět“ elementárních částí tvoří podstatu světa, který je nám pak smyslově přístupný. Tato myšlenka je základem redukcionistického historického úsilí o faktické nalezení (objevení) fundamentální úrovně reality, která je determinující pro všechny odvozené a složené entity. Tento skládankovitý model také může implikovat v souvislosti s několika základními zkušenostmi z přirozeného světa to (obecně se jedná o zkušenost specifického topologického uspořádání vnitřku nějaké organické entity, která obsahuje semena, plody, vnitřnosti či obecně další vnitřní rozpoznatelné části), že svět se chová hierarchicky inkluzivně, že jsou tu různé úrovně, jako u matřjošky, které v sobě zahrnují úrovně další.

V široké historické perspektivě je pak nabíledni, že základní otázky napříště oscilují okolo problému fundamentální úrovně reality (od antických atomistů po dnešní „strunové“ teoretiky) na jedné straně. Na druhé straně pak okolo systematických vztahů mezi odvozenými – emergentními – doménami reality, které tvoří další patra inkluzivního uspořádání našeho světa (od mysteriózních spekulací astrologie či alchymie po moderní systémové teorie). Z těchto primárních intuic a později také různé adekvátních pojmových zachycení vykrystalizují některé možné scénáře, jak tento jeden ze základních problémů reality pojmut. V každém případě napříč tisíciletími sdílíme alespoň částečně některá přesvědčení. Jak se vyjádřil William Blake a vlastně podobně i Leibniz, jakožto příklady za mnohé jiné, se svojí koncepcí monád: Mikroúroveň – nějak abstraktně – reprezentuje makroúroveň (a má symetricky platit i opak).

V tomto kontextu ale skutečně vzniká zásadní otázka vzájemné interakce mezi rozměrově zcela odlišnými škálami reality. Jsou si tyto různé škály nějak podobné, sdílí něco identického, nebo jsou zcela a principiálně odlišné? Tato otázka, jak ještě uvidíme dále, je také zásadní pro pochopení statutu nanotechnologií z hlediska jejich fyzikálně-funkčních omezení.

Když se nyní vrátíme k Leibnizově tezi, je zjevné, že Leibnizova představa o doslovně se opakujících strukturách našeho světa („rybníky a zahrady“) na různých rozměrových škálách matřjoškového uspořádání fyzikální reality je nesprávná. Jestli něco ukázala moderní věda zvláště po objevu kvantové domény (počátek 20. století), tak je to přesný opak Leibnizovy intuice: Svět na mikroúrovni je naprosto odlišný od světa jevové úrovně dostupné

lidským bytostem. Přísně vzato dokonce ani skrze metaforické přenosy či analogie nelze vyjadřovat chování subatomárního světa, nakolik je odlišné od chování věcí v běžně smyslově dostupné realitě. Tato doménová rozmanitost je o to zásadnější, že moderní pojetí fyzikální reality předpokládá to, že existuje ultimátní škála či doména (Planckova úroveň), která je z hlediska zákonů přírody zcela fundamentální a její existence nutně vymezuje možné chování všech ostatních nadstavbových či emergentních vrstev reality. To by v Leibnizové pojetí nebylo možné, protože hierarchie úrovní jeho „monadického“ světa je aktuálně nekonečná a ještě ke všemu fraktální, takže by se fundamentální zákony přírody uplatňovaly na všech úrovních identicky.

Jak vidíme, onu žádanou jednotu (jednotu rozmanitosti) světa Leibniz konstruoval ještě příliš naivně. Pokud nějaká jednotka existuje, bude nepochopitelně abstraktnější. I při současném stavu vědy zůstává otázka interakce a vzájemné zákonité závislosti mezi rozměrově rozlišnými úrovněmi reality záhadou, která je nejznáměji vyjádřena neslučitelností relativistické fyziky (makro-úroveň) s principy kvantové domény (mikro-úroveň).

To, co dnes odborně nazýváme nanoúrovní (nanotechnologií), je přesně tou podivuhodnou doménou, kde se kříží zákonitosti odlišných domén – jedná se kvantovou doménu, o doménu tepelného pohybu molekul a atomů (někdy nazývanou „brownovská“ fyzika) a doménou klasickou (mechanická newtonovská fyzika):

Díky prostředkující pozici nanoškály je občas nazývána „mezo-světlem“. V takovém světě se objevují nejenom kvantové fenomény (jako například princip neurčitosti nebo tunelový efekt), ale také známé fenomény fyziky kontinua (například tepelný tok).¹⁵

Z této perspektivy představuje nanosvět zjevně vysoce komplexní doménu. Opět se ukazuje, že složitost – tak příznačná pro všechno živé (a život se pravděpodobně vyvinul na této úrovni) – je dílem střetu velmi rozmanitých principů.

Může ale opravdu mikro-nano-svět rekapitulovat strukturu makro-světa (jak v podstatě navrhoval Leibniz), nebo to není zcela možné?

¹⁵ Gregor Schieman, „Nanotechnology and Nature,“ in *Nanotechnology Challenges*, eds. Joachim Schummer and Davis Baird (Singapore: World Scientific Publishing, 2006), 85.

4. Tam na dně je spousta místa (ale ne zas tolik!) – Feynmanův výzkumný program

V roce 1959 publikoval slavný fyzik Richard Feynman vizionářský text *There's Plenty of Room at the Bottom*, který se stal paradigmatickým pro celý „nano-diskurz“ zbytku století. Feynman si uvědomil, že mikro-úroveň¹⁶ skýtá obrovské množství efektivního prostoru pro uchovávání informace (dle jeho výpočtu by se v atomovém konglomerátu velikosti špendlíkové hlavičky dala informačně uchovat veškerá literární produkce dosavadní civilizace). Protože svůj text píše v desetiletí, kdy byla objevena a vysvětlena struktura DNA, dobře si uvědomuje, že biologický svět je plný mikro(nano)-systémů, jež bychom mohli principiálně napodobit, a Feynman se domnívá, že by to mohlo být možné čistě fyzikální cestou, kdy by bylo možné operovat s jednotlivými atomy a provozovat tak jemné, cílené inženýrské postupy konstrukce: „Tento fakt – že enormní množství informace může být uloženo na neuvěřitelně malém prostoru – je samozřejmě dobře známý biologům [...]“¹⁷ A také: „Uvažte možnost, že my také můžeme vytvořit miniaturní věci, které dělají, co potřebujeme – že můžeme vytvořit objekty, které na této úrovni manipulují s věcmi.“¹⁸

Feynman rovněž s naivitou (v dobrém smyslu slova), která nápadně připomíná Leibnize, uvažuje o možnosti zmenšování zcela běžných věcí, jako je například automobil či soustruh: „Uvažujte o jakémkoli stroji – například automobilu – a položte si otázku, jaké problémy mohou nastat, pokud bychom je chtěli vytvořit nekonečněkrát menší.“¹⁹

A zde právě Feynman jako vynikající fyzik přichází s jistými fundamentálními rozdíly, které omezují možnost jednoduché funkční duplikace makro-objektů v nano-měřítku. Mezi taková omezení patří například to, že magnetické a elektrické procesy se nechovají stejně na nano-úrovni ve srovnání se světem velkých rozměrů. Dále pak viskozita bude výrazně stoupat, nakolik se blížíme interakci přímo mezi atomy samotnými – pojem „lubrikace“ zde ztrácí na obvyklém významu. Obecně morfologické vztahy definující objekt typu „auto“ nebudou pravděpodobně izomorfní na nano-úrovni (ve srovnání s makro-úrovni), protože, jak sám Feynman připomíná,

¹⁶ Fakticky nano-úroveň a níže. Termín „mikro-úroveň“ tu používáme zcela vágně ve smyslu „světa v malém“ – řekněme od velikosti makromolekul níže až do subatomárních oblastí.

¹⁷ Richard Feynman, „There's Plenty of Room at the Bottom,“ in *Eric Drexler: Engines of Creation 2.0* (Los Angeles: Wowio Books, 2007), 32.

¹⁸ *Ibid.*, 36.

¹⁹ *Ibid.*, 40.

granulární atomová struktura kovů neumožňuje homogenitu – je ale možné zkusit jiné materiály (sklo, plast), pokud bychom chtěli zachovat „formu“ či tvar aut tak, jak ji běžně známe.²⁰

Zde také vzniká filosoficky velmi zajímavá otázka: Za jakých podmínek mění zmenšování věci také její *funkční esenci* (funkční podstatu), takže už by nebylo smysluplné např. tvrdit, že milionkrát zmenšený objekt A, je stále objektem A? Jako příklad funkční esence uvažujme následující: I v nanosvětě může auto mít kola, nápravy, motor, volant atd. a „jezdit“, pak bychom řekli, že nano-auto má identickou funkční esenci s jeho makro-předlohou (normálním autem). Pokud objekty plní identické funkce nezávisle na rozměrové škále, můžeme říkat, že sdílí funkční esenci.

Existují tedy objekty, které se principiálně z hlediska funkční esence nemění, když je zmenšujeme? A naopak: Existují objekty, které mění funkční esenci, jakmile provedete jakékoliv zmenšení? A pokud na obou stranách takové objekty existují, čím se tedy principiálně liší?

Uvažme, že v Leibnizově světě, kde existuje nekonečné úrovní „tam dole“, je principiálně možné duplikovat cokoliv na jakkoli malém měřítku – pozorovatel, kterého byste proporcčně zmenšili do nižších úrovní, by neznamenal rozdíl. Zkusme tedy s Feynmanem i Leibnizem přijmout na chvíli naivní zmenšovací strategii a položme si úplně stejně naivní otázku: Zmenšili jsme automobil, dokážeme také zmenšit řidiče? Ve skutečnosti Feynman tuto, nebo velice podobnou, otázku fakticky také klade a s ním i celá řada autorů sci-fi: „Ačkoli je to poměrně divoký nápad, bylo by zajímavé v rámci chirurgie, kdybychom mohli polknout samotného chirurga.“²¹ Je tedy nějaký principiální rozdíl mezi možností nano-automobilu a nano-člověkem?

Naše odpověď je ano. Náš svět má vysoce pravděpodobně finitní strukturu a dle současné fyziky (Planckova škála), by neustálé zmenšování odhalilo disproporce a strukturální rozdíly s tím, jak klesáme na „dno“ fyzikální reality, a to i v tom případě, že bychom abstrahovali od podivností kvantového světa. Leibnizova podmínka nekonečné strukturovanosti tak není splněna.

Druhou věcí, která se přirozeně nabízí, je intuitivní rozdílnost v komplexitě funkce automobilu a biologické entity typu „člověk“. Pokud se objekt dá popsat jednoduchým algoritmem (tj. jedná se o jednoduchý objekt, který se jednoduše chová), pak jej lze realizovat na mnoha škálách. Pokud je ale objekt vysoce komplexní a obsahuje obrovské množství dílčích vzájemně

²⁰ Ibid., 41.

²¹ Ibid., 43.

provázaných funkčních obvodů, které samy o sobě jsou již škálově rozvrstveny – což je případ biologických entit (člověka) – pak jakékoliv zmenšení, které v konečném souboru částí (finitní struktura přírody) samozřejmě znamená redukci skladebných částí původního makro-systému, destruuje i část konstitutivních funkcí vzorového makroobjektu. A pak se tedy logicky nezachovává funkční esence. Tento argument je třeba chápat jako apriorní, protože vlastně říká tautologii: Jestliže některé funkce vyžadují příslušný počet základních částí či částic (které funkci uskutečňují), pak, pokud nemáme tento příslušný počet částí, tak také nemáme tuto funkci. Pokud chcete sestavit trojúhelník, aby fungoval jako trojúhelník, musíte mít tři tyče. Pokud máte jen dvě tyče, trojúhelník standardním způsobem nesestavíte. A tím se netvrdí nic prostšího než to, že v mereologicky finitním světě se (funkční) esence komplexních a škálově provázaných objektů se zmenšováním nemůže zachovávat. Nebo jinak řečeno, zmenšený člověk na nano-úroveň už není člověkem.

Na podporu předchozího je možné uvést myšlenku Erwina Schrödingera:

Jedině při součinnosti ohromně velkého počtu atomů se statistické zákony skutečně začínají uplatňovat a řídí chování těchto assemblées s přesností rostoucí s počtem jejich atomů. Právě takto nabývají procesy znaků opravdového řádu. Všechny fyzikální a chemické zákony, o kterých je známo, že hrají v životě organismů důležitou roli, jsou této statistické povahy; jakýkoli jiný druh zákonitosti a uspořádanosti, který by si člověk dovedl vůbec představit, je narušován neustálým tepelným pohybem atomů a jeho uplatnění je tak znemožněno.²²

Funkce biologických organismů by se nemohly realizovat, pokud by tu nebyla zásadní redundance „ohromně velkého počtu atomů“, protože organismus z několika mála atomů by díky chaotickému tepelnému kmitání nedržel prostě pohromadě a nemohl by vytvořit stochasticky možný vzor stability. Minimalizovat tak organismy (člověka) na nanoúroveň je proto nemožné.

5. Drexler–Smalley debata o nanotechnologiích jako příklad paradigmatické nesouměřitelnosti

Na počátku nového milénia (2001–2003) se v celku symbolicky odehrála debata mezi Ericem Drexlerem (inženýrství, informatika – autor termínu „nanotechnologie“) a Richardem Smallem (chemie, Nobelova cena za chemii z roku 1996), která míří na samotnou podstatu možnosti nanotechno-

²² Erwin Schrödinger, *Co je život?* (Brno: VUTIUM, 2004), 41.

logií. Oba lze po právu považovat za průkopníky této domény výzkumu. Zcela ukázkově tu před sebou máme dvě velmi odlišné perspektivy, které fundamentálně vychází z odlišných koncepcí přírody a ve svém jádru tak obsahují jistá implicitní filosofická stanoviska. Tento paradigmatický rozkol má ovšem dlouhou historii a začal pravděpodobně již v polovině 17. století:

Čistě kvantitativní, vlastně přímo geometrické pojetí hmoty u karteziánů vyjadřuje první fázi mechanických výzkumů XVII. století a bylo postupně modifikováno a vytlačováno objevy chemickými, jež opět zaváděly kvality [...] do nauk o hmotách, tentokrát již jemněji rozlišovaných. [...] Karteziánský mechanismus ve všech svých formách a přežitcích představuje dobu předchemickou. [...] Vlivný počátek učinil Robert Boyle [...] spisy „The Sceptical Chemist“ (1661) ad.²³

Drexler se Smalleyem tak pokračují v bitvě o výklad přírody, jež se táhne již čtyři staletí.

Eric Drexler rozvinul inženýrské pojetí nanotechnologií, které se dovolává původní Feynmanovy koncepce, jež může být označena za mechanistickou, protože hodlá stavět nano-objekty po vzoru standardních konstrukčních způsobů převzatých z inženýrství, tj., je tu jasný plán, jasné části, které se dají mechanicky poskládat dohromady pomocí strojů, které mají zase mechanický charakter (pouze jsou radikálně zmenšené).

Nakolik se nanotechnologie posune od spoléhání se na proteiny, natolik bude více vyrůstat z inženýrské perspektivy. [...] Právě jako obyčejné nástroje umí vybudovat obyčejné stroje z částí, tak molekulární nástroje budou vázat molekuly dohromady tak, aby vytvořily převodová ústrojí, motory, páky a kapoty, které sloučí, aby vytvořili komplexní stroj.²⁴

Je zjevné, že i Drexler se chce poučit u přírody (proteiny), když uvažuje o nanotechnologiích. Nicméně cílem je rozvinout mechanickou doménu na nano-úrovni. Drexler chce evidentně pouze zmenšit standardní mechanická zařízení podobně, jako navrhoval Feynman. Není jisté, jestli by Drexler přijal následující zobecnění, ale zdá se, že Drexler prostě předpokládá, že mechanická doména je v jistém smyslu univerzální. Když to vyjádříme ještě jinak: Skrytý potenciál přírody v nano-doméně je potenciálem mechanických interakcí spíše než interakcí standardní chemie biogenních

²³ Poznámky Jana B. Kozáka in Julien Offray de la Mettrie, *Člověk stroj* (Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1958), 93.

²⁴ Drexler, *Engines*, 72.

polymerů fungujících pouze ve vodním prostředí, jako se to děje v doméně života, odkud původně ideály nano-strojů pochází a kde jsme se nechali jakožto lidští konstruktéři originálně inspirovat.

Musíme dodat, že to je samozřejmě empirická otázka, zda v nano-doméně z hlediska její potenciální rozmanitosti či komplexity množina možných mechanických nano-strojů je bohatší než proteinová doména, na které biologická evoluce pracovala prozatím několik miliard let a která tvoří základ existence biologické nano-úrovně. Pokud bychom tedy přijali Drexlerovu vizi, otevírala by se tu široká možnost nové konstruologie na úrovni světa molekulárních rozměrů:

Protože molekulární sestavovače (*molecular assemblers*) nám umožní umístit atomy do téměř jakéhokoliv smysluplného uspořádání, umožní nám také postavit téměř cokoliv, co dovolují zákony přírody. Konkrétně nám pak umožní postavit téměř cokoliv, co můžeme vyprojektovat – včetně dalších molekulárních sestavovačů.²⁵

Finální program navržený Drexlerem je pak tento:

V termínech fyziky je dostatečně zřejmé, že pokročilé sestavovače (*assemblers*) budou schopné dělat víc než existující proteinové stroje. Budou stejně programovatelné jako ribozomy, budou ale schopny využívat širší paletu nástrojů než všechny ty buněčné enzymy dohromady. Protože budou vytvořeny z materiálů daleko odolnějších, tužších a stabilnějších než proteiny, budou také schopny vyvinout větší síly, pohybovat se s větší přesností a přestat drsnější podmínky.²⁶

Z posledně řečeného také vyplývá základní a tolik diskutované nebezpečí nanotechnologií. Pokud je Drexlerův návrh fyzikálně, inženýrsky a chemicky realistický, vyplývá z toho, že může existovat alternativní nano-doména vůči standardnímu (biotickému) životu, která díky uvedeným vlastnostem (větší síla, pohyb s větší přesností, odolnost, ...) může konkurovat právě původnímu životu a třeba jej i vytlačit z jeho niky. Drexler spekuluje o tzv. „grey goo“ problému, což se nedá přeložit příliš jinak než jako problém „šedého sajrajtu“, který znamená, že je tu potenciální nebezpečí, kdy se samo-replikující ne-biologičtí nano-boti „spláší“ a začnou se neřízeně reprodukovat, čímž zničí všechno ostatní – veškerý život, veškeré biotické zdroje a potenciálně celou planetu, kterou prostě využijí jako zdroj

²⁵ Ibid., 76.

²⁶ Ibid., 80.

pro vlastní replikaci. Drexler tak upozorňuje na hluboké etické problémy, které se s nanotechnologiemi vynořily.

To nás přivádí ke klíčové otázce nanotechnologií: Co jsou a jak jsou možné ony „molekulární sestavovače“, protože o jejich možnosti právě Drexler se Smalleyem vedou hluboce nesouhlasnou debatu. Tím se také přesuneme ke Smalleyho reakci, která zásadně popírá možnost jednoduchého mechanického skládání a sestavování na úrovni světa molekul. Smalleyho krédo zní, že chemie není mechanika a liší se fundamentálně.

Jak již bylo vícekrát řečeno, vzorem nanotechnologií jsou evolucioně vybudované komponenty, které operují na buněčné úrovni. Jedná se zejména o proteiny (enzymy, ribozomy), RNA a jako ukázkový nanostroj jsou nejčastěji uváděny právě ribozomy, které sestavují z aminokyselin složité proteiny.

Těmto buněčným entitám můžeme právě říkat „molekulární sestavovače“ (*molecular assemblers*). Otázka pak stojí tak, jestli je možné modelovat např. ribozomy jako mechanické stroječky, jako něco, co může být uděláno jinak a fungovat i v jiném prostředí. Existují nějaké univerzálnější sestavovače a prostředí pro tyto sestavovače, kde ribozomy budou jen speciální podmožinou fungující ve speciálním biotickém prostředí?

Chemici světových jmen, právě jako George Whitesides či Richard Smalley se domnívají, že to možné není, že Drexlerova (a Feynmanova) inženýrská úvaha trpí funkcionalistickou abstrakcí, tj. abstrakcí, která se soustředí na jednu abstraktní funkci a opomíjí reálné nutné komplexní podmínky fungování molekulárních sestavovačů na nano-úrovni. Pojdme rovnou k některým základním argumentům chemické strany.

Předně je třeba uvážit následující:

Příroda již je v tomto smyslu relevantní pro nanotechnologie, protože prezentuje jisté vývojové možnosti na dosud nedostatečně prozkoumaných zákonech mezo-škály nacházející se mezi kvantovými a spojitými jevy. Je možné, že přesnější vymezení těchto zákonů značně omezí možné technologie na této mezo-škále.²⁷

To je jistě poněkud skeptický argument, který by se jistě dal i obrátit, ale v každém případě naznačuje, že ne vše musí být možné a že mohou existovat silná „průniková“ omezení diktována zákony mezo-škály (nano-oblast).

Velice důležitým argumentem proti Drexlerovu mechanickému programu je Smalleyho argument přezdívaný „fat and sticky fingers“ – tlusté a ulepené prstíky. Smalley se domnívá, že pokud mají být molekulární

²⁷ Schieman, „Nanotechnology and Nature,“ 91.

sestavovače možné jakožto mechanické stroje, musíme je modelovat jako tradiční robotické mechanické ruce, ramena a prsty – odtud ona přezdívká. Problém je, že na molekulární úrovni se takto jednoduché analogie a modely použít nedají. Molekulární, ale stále mechanické prsty budou dle Smalleyho „tlusté“ v tom smyslu, že nebudou moci operovat s žádoucí jemností, která musí sahat často níže až na úroveň jednotlivých atomů. Úplně podobně se to má s jejich „lepivostí“, protože samotné prsty jsou samozřejmě také molekulární struktury, a tak jejich „povrch“ bude silně interagovat s molekulami, které drží v sevření. Biologické entity tyto problémy řeší zjevně jinak.

Abychom si uvědomili jemnost operací vnitrobuněčných procesů – které jsou stále jediným zdrojem našich zkušeností se samouspořádávajícími a reprodukujícími se entitami na nano-úrovni –, podívejme se na formulace nobelisty za fyziologii a medicínu Paula Nurse: „Tyto enzymy nejsou jen extrémně rychlé, ale bývají i extrémně precizní. Dovedou manipulovat s jednotlivými atomy či elektrony s takovou mírou přesnosti, že se o ní inženýrům chemie ani nezdálo.“²⁸ A ještě:

Důležitý krok v zachycování energie při buněčném dýchání vychází z přesunování protonů, což jsou jednotlivé atomy vodíku zbavené elektronu, čímž získají elektrický náboj. Protony jsou vytlačovány ze středu mitochondrie do mezery mezi dvěma membránami, jež každou mitochondrii obklopují.²⁹

Z řečeného je zřejmé, že jemnost operací buněčných organel-nanotechnologií (enzymů a mitochondrií) jde ještě o několik řádů dál za samotnou škálu nano-domény – bavíme se o manipulaci na úrovni elektronů a protonů. Takové jemnosti nelze dosáhnout žádnými mechanickými „prsty“.

Pokud tedy přistoupíme na tezi, že v podstatě klasické mechanické prstíky nejsou efektivní v nano-oblasti, pak jaké možnosti zbývají, táže se Smalley. Jedině něco podobného, jako se děje v přírodě, tj. generálně využít bílkovinné struktury, jenže ty jsou závislé na jistých vymezejících podmínkách: „Opravdu si myslíte, že je možné něco jako enzymovou chemii libovolně komplexity dělat na suchých površích a ve vakuu?“³⁰ či „Jak chcete nahradit ztrátu hydrofilních/hydrofobních, ionty rozpouštějících či vodík vázajících schopností vody, která takto diriguje precizní třídimenzionální

²⁸ Paul Nurse, *Biologie v pěti lekcích* (Praha: Argo a Dokořán, 2021), 72.

²⁹ *Ibid.*, 81.

³⁰ Richard Smalley, „Response,“ in *Eric Drexler: Engines of Creation 2.0* (Los Angeles: Wowio Books, 2007), 547.

struktury a membrány?³¹ a nakonec: „Pokud existují nějaké formy života (chemicky) nezávislé na vodním prostředí, pak nám po staletí tento typ chemie zcela unikal.“³²

Přirozená nano-technologie, zdá se, nejde dělat bez vody a pak zde vzniká celá řada omezujících podmínek pro konstrukci nano-úrovně, která by se svými funkcemi alespoň blížila tomu, co známe z biologických buněk.

Dále je tu problém se sebe-uspořádáním a sebe-replikací: „Jak poznamenává chemik-průkopník George Whitesides: „Protože samoorganizování potřebuje, aby složky byly pohyblivé, obvykle k němu dochází v tekuté fázi [...] nebo na hladkých površích.“³³ Zdá se, že tu jsou jistá omezení, kde mohou molekulární sestavovače fungovat z hlediska skupenství prostředí – život to umí jen v tekutinách a ty se fyzikálně chovají zcela jinak, než mechanické struktury. A také se řečeným znovu potvrzuje privilegovanost vodního prostředí.

Nakonec je tu Smalleyho velmi pozoruhodné vyjádření, které užije jako konečný argument proti celému Drexlerovu programu. Toto vyjádření je zajímavé z mnoha důvodů, dokonce i jako rétorická figura. Posudme:

Stejně jako nemůžete chlapce a dívku přinutit k zamilování se tím, že je k sobě přitlačíte, tak úplně podobně nemůžete provozovat přesnou chemii mezi dvěma molekulárními objekty skrze jednoduchý mechanický pohyb s pár stupni volnosti v referenčním rámci určeném (složitými) molekulárními sestavovači (*molecular assemblers*). Chemie, podobně jako láska, je daleko rafinovanější. Potřebujete reaktanty provést specifickou reakční koordinátou a tato koordináta se vine mnohodimenzionálním hyperprostorem.³⁴

Pro laiky je velmi těžké pochopit, co zde Smalley míní. Úplně obdobně je pro nás těžko představitelné to, co se děje uvnitř buněk a pro co nemáme žádný přirozený myšlenkový model. Musíme si uvědomit, že mechanika je pro nás kognitivně nesmírně přirozená, protože elementárně vychází z pozorovatelných pohybů částí našeho těla. Tím jsme vždy limitováni a máme tendence tento myšlenkový model přenášet i do nepatřičných domén reality. Co se ovšem míní „mnohodimenzionálním hyperprostorem“, je velmi těžké říci. Nevíme, jestli jsme tu kompetentní Smalleyho vyjádření převést na nějakou

³¹ Ibid.

³² Ibid.

³³ Amos, *Na úsvitu*, 239.

³⁴ Richard Smalley, „Final Response,“ in *Eric Drexler: Engines of Creation 2.0* (Los Angeles: Wowio Books, 2007), 553.

srozumitelnou metaforu či analogii, i když nám sám Smalley nabízí analogii se zamilovaností a láskou, které jsou vždy výsledkem skutečně složitých interakcí (působení mnoha dimenzí). Představme si, že vzájemné interakce bílkovinných struktur jsou určovány složitými stereometrickými, topologickými i měřítkovými konstelacemi těchto makromolekul, které jsou ještě ke všemu v permanentním toku a mají širokou variabilitu, aby se vzájemně adaptovaly a staly se tak konformními.

Možná by se celá věc ještě dala vyjádřit jinak: V našem světě přirozené (zejména tělesné) zkušenosti rozlišujeme dobře objekty, které mají jasné časoprostorové vymezení a stabilitu a rovněž u nich můžeme rozpoznat jejich části, které mají podobné měřítko jako celek a jsou podobně stabilní (to se týká původně zkušenosti našeho těla, které je naším prvním referenčním rámcem, jak kdysi poznamenal Henri Poincaré). V této doméně na prvním pohled může fungovat jednoduchá mechanika vratných procesů.

Zcela jiným typem „objektů“ jsou fluidní procesy, jako je kouř ohně nebo proud vody, které jsou ovšem také součástí naší přirozené zkušenosti. Zde nejsou ani stabilní objekty, ani identifikovatelné jednotlivé části (či identifikovatelná různá měřítká částí) a ještě méně vratnost, jak si památne všiml již Hérakleitos z Efezu.

A teď si představme prolnutí těchto dvou zcela odlišných, a dokonce rozporných systémů či kombinaci jejich vlastností. Mohli bychom dostat systém, který má některé části stabilní, některé nestabilní; který má škálovou strukturu, a proto se může chovat stochasticky a nevratně; který je v toku, ale tok je systematicky segmentován relativně stabilními objekty různých měřítek, či jejich spojeními.

Takový systém neznáme z našich běžných smyslových pozorování, a tak i naše intelektuální intuice selhává. Takový systém ale asi docela dobře odpovídá tomu, co se děje na úrovni buňky a vlastně celého biologického organismu. To je i to, co má v podstatě na mysli i Richard Smalley. Takový typ architektury je architekturou života a naše mechanistické mentální modely se s ní dostávají do rozporu. Zde se také rýsuje základní axiologický spor o povahu přírody – zejména živé přírody – ve vztahu k myšlení.

6. Etické konsekvence molekulární výroby a syntetické biologie

Ve své finální odpovědi Smalley Drexlerovi vyčítá,³⁵ že konceptem „grey goo“, který je dle Smalleyho nerealistický, protože je založen na naivním

³⁵ Ibid., 555–56.

mechanicismu, pouze straší děti a intelektuální komunitu. Zkusme tedy nyní blíže nejprve popsat úvahu Drexlera a jeho následovníků a posoudit, co je a není relevantní etická otázka spojená s jeho pojetím nanotechnologií, ve chvíli, kdy se na základě současného stavu výzkumu a vývoje budeme snažit realisticky vymezit současné fyzikálně-chemické a inženýrské limity nano-technologií.

Jak už bylo řečeno, Drexler navázal na Feynmanovo inženýrské pojetí nanotechnologií, v tom smyslu, že oba zvažují jako reálnou možnost čistě fyzikální cestou operovat s jednotlivými atomy a na této úrovni využít cílené inženýrské postupy ke konstrukci nano-objektů. Drexler konkrétně hovoří o tzv. molekulární výrobě, jejímž cílem je tvořit na úrovni atomů nanorozměrné struktury. Nejde ovšem o tvorbu samotnou. Zároveň má sloužit k výrobě nanorozměrných strojů, které by nejen vytvářely nové produkty, ale rovněž své duplikáty a tím by zrychlily a zefektivnily samotnou molekulární výrobu. Ta by díky tomu byla velmi levná a účinná. Ve chvíli, kdy se budeme snažit představit negativní důsledky, ke kterým by molekulární výroba mohla vést, vyjímají se mezi nimi např. výroba velmi efektivních nanotechnologických zbraní s novými vlastnostmi. Výroba spojená s nanostroji by navíc podpořila masovou produkci a tím pádem by přispěla k závodům ve zbrojení. V kombinaci s vyspělou robotikou by pak mohla přinést úbytek pracovních míst v řadě sektorů, nebo snížit rozsah globálního obchodu. Nicméně tyto a další obdobné problémy jsou založené na logice, že nanotechnologie přinášejí nové vlastnosti nebo třeba posilují účinnost, např. zbraní, léků apod. Z toho důvodu nepředstavují nějaký mimořádný etický problém, ve smyslu nového problému, který jsme doposud u technologií neřešili. Obecně jsou spojeny spíše s tematikou dvojího účinku (záleží na tom, jak danou technologii použijeme, zda za „dobrým“ či „špatným“ účelem), nebo externalit, tedy nezamýšlených důsledků nebo nezapočtených nákladů.

Molekulární výroba však bývá řazena mezi další významná celosvětová katastrofická rizika, na rozdíl od jiných aplikací spojených s nanotechnologiemi (obecně jsou za největší potenciální zdroje existenčních rizik spojených s moderními technologiemi kromě molekulární výroby považovány především biotechnologie a strojová inteligence).³⁶ Nejdiskutovanějším je

³⁶ Viz např. Chris Phoenix and Mike Treder, „Nanotechnology as Global Catastrophic Risk,“ in *Global Catastrophic Risks*, eds. Nick Bostrom and Milan M. Cirkovic (Oxford: Oxford University Press, 2011) nebo Toby Ord, *The Precipice: Existential Risk and the Future of Humanity* (New York: Hachette Books, 2020).

pak již zmíněný „grey goo“ problém nekontrolovaně se samoreplikujících nanobotů, kteří se vymkli kontrole. Tento příklad podle našeho soudu splňuje načrtnuté pojetí mimořádnosti. Tito nanoboti by jednak mohli přispět k environmentální degradaci, kontaminaci a ničení životního prostředí, v nehorším scénáři by mohli zničit veškerý život, případně celou planetu. Především z důvodu exponenciálního růstu jejich počtu, a s tím spojené spotřeby energie z okolního prostředí pro jejich vlastní replikaci.

Přestože taková výroba vypadá dosud příliš futuristicky, není zcela bez reálného základu. Svědčí o tom například různé úspěchy ve vytváření molekulárních objektů, včetně molekulárních strojů,³⁷ případně snahy o tvorbu stroje, kterému by podle zadání tvořil a optimalizoval strukturu molekuly.³⁸ Podle dřívějších odhadů už jsme měli technologií molekulární výroby disponovat,³⁹ z čehož evidentně vyplývá, že ačkoli není Drexlerova úvaha zcela neadekvátní a chybná, nebo naivně mechanistická, její zařazení mezi existenční rizika naší civilizace je minimálně předčasné.

V tomto ohledu je určitě na místě přijmout Smalleyho výtku vůči Drexlerovi, že nás odvrací od jiných reálných problémů, kterým budeme muset s nanotechnologiemi čelit v blízké budoucnosti. Bohužel již Smalley neříká, jaké by měly být ty reálné problémy. Domníváme se ale, že je lze velmi jednoduše dovést, pokud se vrátíme k projektu tzv. „syntetické biologie“, která je mimo jiné zaměřena na vytváření umělých buněk a buněčných jevů.⁴⁰ Jedním z milníků na poli výzkumu vedoucímu k utváření základní formy známého života, buňky, bylo, když v roce 2010 tým genetika Craiga Ventera provedl syntézu prvního bakteriálního genomu pojmenovaného *Synthia* a zároveň do syntetického genomu bakterie zašifrovali několik sdělení, mezi kterými se objevila tradovaná poslední Feynmanova věta zapsaná na tabuli: „*Co nedovedu vyrobit, tomu nerozumím.*“⁴¹ Současným snahám v tomto úsilí

³⁷ Viz více Celia Henry Arnaud, „C&EN’s Molecules of the Year for 2020,“ *Chemical & Engineering News* 98, no. 48 (2020).

³⁸ Více viz projekt Dial-a-molecule (web), navštíveno 6. května 2022, <https://www.biomedcentral.com/collections/DaM>.

³⁹ Phoenix and Treder, „Nanotechnology as Global Catastrophic Risk,“ 499.

⁴⁰ K tomuto tématu také viz Michal Trčka, „Filosofická reflexe syntetické biologie, etické a společenské výzvy,“ in *Biofyzika I*, eds. David Lukáš et al. (Liberec: Technická univerzita v Liberci), 152–66.

⁴¹ Bill Mesler a James H. Cleaves, *Stručné dějiny stvoření: věda a hledání počátku života* (Praha: Vyšehrad, 2020), 275–76.

tvorby umělé buňky vede přístup „zdola nahoru“ (*bottom-up*) s cílem z neživé hmoty vytvořit umělou živou buňku nebiologického původu.⁴²

Je důležité si povšimnout především toho, že nejde o to tvořit život stejně jako příroda, ale o napodobení celého procesu, nebo živé hmoty. Tento způsob modelování zdola nahoru s cílem uskutečnit přechod mezi neživou a živou hmotou a stvořit život z jeho molekulárních složek je přitom prováděn „inženýrským způsobem“. I když totiž odmítneme esencialismus a redukcionismus obsažený v mechanicismu, nezaniká tím možnost tvorby umělého života, např. skrze přístup tzv. „chemické syntetické biologie“, což dokazuje i současný stav výzkumu. Z toho vyplývá, že etické otázky spojené s molekulární výrobou v určité formě přetrvávají. V tomto ohledu Smalleyho kritika neobstála, ale naopak se potvrzují některé Feynmanovy a Drexlerovy vize, i když na úrovni napodobování přírody, o které hovoří Smalley.

Co je na tom ale nejdůležitější, jsou mimořádné vlastnosti, které můžeme vytvořit díky nano-úrovni (na které je možné například z kovů udělat polovodiče). Buňky tedy mohou získat nové vlastnosti, které se dosud v živé přírodě nevyskytují. Např. tzv. xenobiologie (chemická syntetická biologie) se zabývá modifikacemi genetické informace za účelem výroby xenonukleových kyselin (XNA) – např. modifikace nukleotidových bází DNA mimo A, G, C a T a začlenění alternativních syntetických nukleotidů do DNA (tímto způsobem už vědci zkonstruovali několik alternativních genetických polymerů schopných párování bází s DNA a polymerázami, které by mohly syntetizovat XNA z DNA šablony a zpětně přepsat XNA zpět do DNA); nebo třeba také výrobou nových bílkovin (vědci identifikovali přes 50 nepřirozených aminokyselin, které mohou být začleněny do peptidu).⁴³ Jak předpovídá genetik a buněčný biolog, nositel Nobelovy ceny za fyziologii a lékařství, Paul Nurse:

Chemické děje spjaté se životem jsou mnohem přizpůsobivější a efektivnější než většina chemických procesů, jež lidé uskutečňují v laboratořích nebo továrnách. Pomocí GM a syntetické biologie bychom mohli reorganizovat chemickou vynalézavost života a využít ji k novým důležitým účelům. [...] Mohla by nás

⁴² Např. projekt *Building a Synthetic Cell*, podle jehož cíle by se to mělo podařit do roku 2027. Viz více např. Zhanar Abil and Christophe Danelon, „Roadmap to Building a Cell: An Evolutionary Approach,“ *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020): 927.

⁴³ Viz Secretariat of the Convention on Biological Diversity, „Synthetic Biology,“ *CBD Technical Series*, no. 82 (2015): 20.

dovést až k výrobě upravených rostlin, zvířat a mikrobů, kteří budou produkovat naprosto nové druhy léků, paliv či textilních a stavebních materiálů.⁴⁴

Nicméně tím, že stejně jako se nanotechnologie pohybují na hraně mezi světem klasické a kvantové fyziky, tak i život nemůže fungovat, aniž by byl spojen s kvantovým světem.⁴⁵ Proto dosáhnout těchto cílů je tak náročným úkolem, který má před sebou překážky v podobě omezených znalostí kvantového světa. Velký pokrok však přineslo spojení biotechnologií s umělou inteligencí. Kupříkladu dceřiná společnost Googlu DeepMind Technologies v roce 2020 dokončila systém, který využívá principu neuronové sítě, s názvem AlphaFold.⁴⁶ V časopisech *Science* a *Nature* byly pak v červenci 2021 zveřejněny informace o fungování obdobného systému RoseTTAFold a podrobnosti o AlphaFoldu.⁴⁷ Umělá inteligence tak podle mnohých komentářů způsobí revoluci ve vědách o životě, protože pomůže výzkumníkům analyzovat fungování proteinů, jako základních stavebních prvků života v atomovém měřítku. Ke zrychlení výzkumu navíc přispívá on-line přístupná databáze, která dokáže rychle a přesně předpovídat 3D atomové struktury většiny proteinů.⁴⁸ Nejedná se přitom jen o rozluštění jedné z největších výzev biologie určit 3D tvar bílkoviny z její aminokyselinové sekvence, ale otevřenou cestu k mimořádným aplikacím v bioinženýrství. V posledních měsících už se začalo pracovat na projektech zaměřených na vývoj nových léků, studium rezistence vůči antibiotikům, tvorbu výživnějších plodin, nebo vyvinutí „zelených enzymů“, které dokážou štěpit plasty.⁴⁹

Pokud se budeme držet tradičních etických témat, pak syntetická biologie může přinést nové podoby sociální nerovnosti (lokální i globální), především pak v oblasti bezpečnosti, ekologické udržitelnosti a hospodářské dislokace. Ale pokud bychom skutečně opustili Drexlerův a Feynmanův projekt mechanického nano-světa a pokusili se duplikovat či alternovat

⁴⁴ Nurse, *Biologie v pěti lekcích*, 131.

⁴⁵ Jim Al-Khalili a Johnjo McCadden, *Život na hraně: nadcházející věk kvantové biologie* (Praha: Vyšehrad, 2019), 340–41.

⁴⁶ K tomuto tématu viz rovněž popularizační text: Michal Trčka, „Život jako technologický produkt? Revoluce v biologii, on-line a zdarma,“ *Přítomnost*, 4. srpna 2021, <https://www.pritomnost.cz/2021/08/04/zivot-jako-technologicky-produkt/>

⁴⁷ John Jumper et al., „Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold,“ *Nature* 596 (2021): 583–89; Andrew Senior et al., „Improved Protein Structure Prediction Using Potentials from Deep Learning,“ *Nature* 577 (2020): 706–10.

⁴⁸ Viz AlphaFold Protein Structure Database (web), navštíveno 6. května 2022, <https://alphafold.ebi.ac.uk>.

⁴⁹ Ewen Callaway, „It Will Change Everything: Deepmind’s AI Makes Gigantic Leap in Solving Protein Structures,“ *Nature* 588 (2020): 203–4.

reálné biologické základní komponenty zejména v buněčných procesech, můžeme spustit dost možná ještě větší nebezpečí, než je problém „grey goo“. Ve chvíli, kdy se syntetizované organismy dostanou do volné přírody, se tak dostáváme na rovinu mimořádnosti etických implikací nanotechnologií, v podobě rizik pro biologické či ekologické systémy vyplývajících z evoluční složitosti genových a obecně biochemických interakcí. Některé odhady hovoří o potenciálním nebezpečí v podobě narušení a proměny fungování ekosystému, jiné o vytlačení a vyhynutí některých forem života, určité populace nebo druhů.⁵⁰

Když na chvíli popustíme uzdu fantazii, pak buněčný bioinženýring znamená zasahování do originální biologické evoluce na její základní úrovni, protože život začíná s nejjednoduššími buňkami. Nakolik život na této planetě započal na bílkovinných a lipidových strukturách, natolik je syntetická biologie potenciálním zdrojem alternativní (realistické) biologické evoluce. Bylo by jistě fascinující, kdybychom objevili, že darwinovský evoluční strom se mohl větvit i jiným způsobem, nebo že dokonce může existovat nejméně jeden strom paralelní. Mohli bychom také tímto způsobem modelovat alternativní scénáře průběhu biologické evoluce a stvořit tak druhy, které nejen že vymřely, ale které třeba ani vůbec neexistovaly. V každém případě se tu objevuje nebezpečí, které původně předpokládal Drexler u „grey goo“: Totiž že tyto nové systémy budou usilovat o obsazení niky originálních organismů vzniklých přirozenou evolucí. Je hlubokou otázkou, zda je potenciálně rizikovější nový umělý (leč biologický) život, nebo Drexlerovi nano-roboti (*grey goo*). Problematika „grey goo“ se tedy opět vrací do hry, jen ne jako v překladu „šedý sajrajt“, ale jako „zelený sajrajt“ (*green goo*), tedy jako uměle vytvořená samoreplikující se biotická entita, která může vést k narušení globální ekologie:

Produkty nanotechnologií budou natolik nepodobné čemukoliv, co se přirozeně vyvinulo, že pravděpodobnost, že jejich populace bude mít nějakou přirozenou kontrolu a rovnováhu, je mizivá. [...] Druhým faktorem, který odlišuje předchozí antropogenní narušení globální ekologie od narušení nanotechnologií, je otázka ekologické niky. [...] Tyto organismy způsobí takovou spoušť právě proto, že není nic, co by kontrolovalo jejich šíření mimo jejich původní ekologickou niku. [...] Třetí důvod, [...] souvisí s objemem. Samotný počet entit, které by mohly být v krátké době vytvořeny samoreplikujícími se nanoboty,

⁵⁰ Benjamin D. Trump et al., „Synthetic Biology: Perspectives on Risk Analysis,“ in *Synthetic Biology 2020: Frontiers in Risk Analysis and Governance*, eds. Benjamin D. Trump et al. (Cham: Springer, 2020): 6–11.

činí tuto vyhlídku dramaticky odlišnou od všech dříve známých uměle vytvořených organismů.⁵¹

To nás tedy vede k určitému paradoxu. Smalley vyčítá Drexlerovi, že straší společnost s „grey goo“, který je postavený na mechanistických principech, ten by ale postrádal všechno to, čím disponuje organický život ve své rudimentární bázi, tedy intencionalitu, autoreprodukční schopnosti, konzistenci s okolním prostředím atd. Smalley sám připouští a navrhuje, že bychom naopak měli postupovat tak, jak to dělá příroda a vlastně vytvořit něco jako život 2.0 (námi uměle vytvořený, ale na stejných systémových principech původního biotického života). Tato varianta se jeví jako realizovatelná v blízké budoucnosti a co je důležitější, jako zároveň daleko nebezpečnější. Rizika jsou stejná, tedy že by život 2.0 vytlačil původní život, jak ho vytvořila evoluce na této planetě za 4 miliardy let, ale pravděpodobnější hrozbou je „green goo“. Právě v tom spočívá mimořádnost situace, největší etické výzvy a rizika v oblasti biotechnologií, které využívají poznatků o nanostruktuře života.

Poslední významem nanotechnologie, u kterého se domníváme, že by mohl být označen jako mimořádný, je proměna hodnotového systému zapříčiněná vytvářením umělého života s podporou inženýrských postupů. Nicméně těžko se dá tato proměna postojů, hodnot, přesvědčení sledovat a adekvátně popsat z důvodu složitosti proměny hodnotového systému, který je otevřenou strukturou, do jejíhož utváření zasahuje řada různých proměnných. Nicméně jak tyto možnosti dané vývojem v oblasti nanotechnologií a jejich propojení s biotechnologiemi, tak hypotetické problémy, které přináší, budou mít nepochybně nějaké hodnotové důsledky. Rozvoj moderní vědy a technologií navíc nikdy nebyl neproblematicky akceptován společností, a proto také tyto možnosti evidentně přináší a ještě přinesou nový typ hodnotových konfliktů. Ten se projevuje třeba jako základní axiologický spor o povahu přírody – zejména živé přírody, kde se mechanistické modely dostávají do střetu s architekturou života, jak jsme ji doposud chápali. Není ani tak důležité samotné vědecké poznání architektury života, jako proměna vnímání života širší veřejností, které totiž není jednoduchým odrazem vědeckého pohledu na svět. Vytváření nových forem života se tak jeví jako problematické ze symbolických důvodů v podobě problematiky rozmazávání hranice mezi živými a neživými systémy, hodnocení živých

⁵¹ Christopher J. Preston, „The Promise and Threat of Nanotechnology: Can Environmental Ethics Guide Us?“, in *Nanotechnology Challenges*, eds. Joachim Schummer and Davis Baird (Singapore: World Scientific Publishing, 2006), 234–37.

organismů skrze mechanické chápání života jako technologického procesu nebo produktu apod.⁵² Snaha upravit stávající, nebo vytvořit nové formy života (na molekulární úrovni), které se nenacházejí v přírodě, mají tedy nepochybně svůj etický rozměr, který se týká nejen oblasti rizik, ale i našich hodnotových systémů.

7. Závěr

Cílem našeho uvažování bylo zdůraznění mimořádných a potenciálně revolučních důsledků, které s sebou nese nanotechnologie. Klíčovou tezí je přesvědčení, že nanotechnologie zastává v evoluci lidských technologií specifické místo díky tomu, že se inspiruje doménou, která je vlastní počátku života. Tento fakt se dá asi velmi těžko přecenit. Můžeme s Feynmanem a dalšími spekulovat o možnosti zmenšování různých technických artefaktů, můžeme také uvažovat o základních fyzikálních omezeních tohoto programu „miniaturizace“ a můžeme nakonec uvažovat o širokých praktických důsledcích tohoto vědeckého programu.

Drexler–Smalley debata by nás zase měla přimět k tomu, abychom vědecky realisticky vymezili fyzikálně-chemické a inženýrské limity nanotechnologií.

Diskuze o možnostech, limitech a případných nebezpečích nanotechnologií (vycházející z debaty E. Drexlera a R. Smalleyho) je prototypem střetu dvou paradigmaticky rozdílných přístupů moderní vědy k chápání přírody na tak zvané „nano-úrovni“. Při bližším pohledu se ukazuje, že se ve skutečnosti jedná o speciální případ staré filosofické otázky o faktických i explanačních možnostech mechanismismu jakožto (nejspíše však domněle) univerzální teorie přírodních procesů (v rámci nanotechnologií o mechanistických předpokladech a jejich kritice z pozice fyzikální chemie a jejich systémových principů). Za celou debatou se pak v hloubi implicitně skrývá otázka o charakteru rozdílností „nanorobotů“, které stvořila biologická evoluce s jejich specifickými funkcemi a schopnostmi (vnitrobuněčné sebe-replikační procesy například; život na mikro-úrovni obecně), a „nanorobotů“, které se chystáme vytvořit uměle dle tradičních inženýrských postupů.

Podle našeho mínění je ale nejzásadnější to, že nano-doména má potenciál – zejména v rámci výzkumného programu syntetické biologie – napodo-

⁵² Více viz Michal Trčka, „Filosofická reflexe syntetické biologie,“ X; Filippa Lentzos et al., „The Societal Impact of Synthetic Biology,“ in *Synthetic Biology: A Primer*, eds. Geoff Baldwin et al. (London: Imperial College Press, 2012), 131–49.

bovat, variovat, využívat či rekonstruovat základní buněčné procesy, které jsou strukturálním základem životních procesů veškerých biologických entit na této planetě, které vznikaly evolucí v horizontu několika miliard let.

Protože jako lidské bytosti zastáváme určité základní morální intuice a jedna z těch nejzákladnějších intuicí říká, že život je hodnotný a že má hodnotu sám o sobě, pak potenciální revoluce v nanotechnologiích musí dále rozvinout i tuto základní intuici. Chtěli bychom tu zdůraznit zejména pozitivní možnosti nanotechnologií, protože ty negativní jsou poměrně zřejmé, jak jsme naznačili výše. Bylo by do budoucnosti lákavé a axiologicky konstruktivní, kdybychom základní intuici o hodnotě života rozpracovali do větší šíře v souvislosti s poznáním možností nanotechnologií, které hodláme do budoucna primárně chápat právě jako technologie rozvíjející možný život. Nebylo by z tohoto hlediska působivé, kdyby se nám díky vývoji nanotechnologií podařilo učinit živé entity robustnějšími a rozšířit je do okolního vesmíru? To by byl projekt hodný skutečně „biofilní“ civilizace, která pochopila, že entropie je všudypřítomná a že život, který jí vzdoruje, je nesmírně vzácný.

Bibliografie:

Abil, Zhanar, and Christophe Danelon. „Roadmap to Building a Cell: An Evolutionary Approach.“ *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020): 927. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00927>.

Al-Khalili, Jim, and John McCadden. *Život na hraně: nadcházející věk kvantové biologie*. Praha: Vyšehrad, 2019.

Allhoff, Fritz, Patrick Lin, James H. Moor, and John Weckert, eds., *Nanoethics: The Ethical and Social Implications of Nanotechnology*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007.

AlphaFold Protein Structure Database (web). Navštíveno 6. května 2022. <https://alphafold.ebi.ac.uk>.

Amos, Martyn. *Na úsvitu živých strojů*. Praha: Mladá fronta, 2007.

Arnaud, Celia Henry. „C&EN’s Molecules of the Year for 2020.“ *Chemical & Engineering News* 98, no. 48 (2020).

Bennett-Woods, Deb. *Nanotechnology: Ethics and Society*. London: Taylor & Francis, 2008. <https://doi.org/10.1201/9781420053531>.

Berg Olsen, Jan Kyrre, Stig Andur Pedersen, and Vincent F. Hendricks, eds., *A Companion to Philosophy of Technology*. Oxford: Blackwell, 2009.
<https://doi.org/10.1002/9781444310795>.

Blake, William. „Prorocství nevinosti.“ In *William Blake: Písničky nevinosti a zkušenosti*. Praha: BB art, 2001.

Bonner, John T. *Na velikosti záleží*. Praha: Mladá fronta, 2008.

Callaway, Ewen. „It Will Change Everything: Deepmind’s AI Makes Gigantic Leap in Solving Protein Structures.“ *Nature* 588 (2020): 203–4.
<https://doi.org/10.1038/d41586-020-03348-4>.

Capra, Fritjof. *Tkáň života*. Praha: Academia, 2004.

Clark, Andy, and David Chalmers. „The Extended Mind.“ *Analysis* 58, no. 1 (1998): 7–19.

Dennett, Daniel. *Druhy myslí*. Praha: Academia, 2004.

Dial-a-molecule (web). Navštíveno 6. května 2022.
<https://www.biomedcentral.com/collections/DaM>.

Drexler, Eric. *Engines of Creation 2.0*. Los Angeles: Wowio Books, 2007.

Edelman, Gerald. *Second Nature*. New Haven: Yale University Press, 2007.

Feynman, Richard. „There’s Plenty of Room at the Bottom.“ In *Eric Drexler: Engines of Creation 2.0*. Los Angeles: Wowio Books, 2007.

Gell-Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar*. New York: Holt Paperback, 1994.

Jumper, John, Richard Ewans, Alexander Pritzel, Tim Green, Michael Figurnov, Olaf Ronneberger, Kathryn Tunyasuvunakool, Russ Bates, Augustin Židek, Anna Potapenko, Alex Bridgland, Clemens Meyer, Simon A. A. Kohl, Andrew J. Ballard, Andrew Cowie, Bernardino Romera-Paredes, Stanislav Nikolov, Rishub Jain, Jonas Adler, Trevor Back, Stig Petersen, David Reiman, Ellen Clancy, Michal Zielinski, Martin Steinegger, Michalina Pacholska, Tamas Berghammer, Sebastian Bodenstern, David Silver, Oriol Vinyals, Andrew W. Senior, Koray Kavukcuoglu, Pushmeet Kohli, and Demis Hassabis. „Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold.“ *Nature* 596 (2021): 583–89.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>.

Kitcher, Philip. *The Ethical Project*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2011.

La Mettrie, Julien Offray de. *Člověk stroj*. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1958.

Leibniz, Gottfried Wilhelm. *Monadologie*. Praha: Svoboda, 1982.

Lentzos, Filippa, Caitlin Cockerton, Susanna Finlay, R. Alexander Hamilton, Joy Yueyue Zhang, and Nikolas Rose. „The Societal Impact of Synthetic Biology.“ In *Synthetic Biology: A Primer*, edited by Geoff Baldwin, Travis Bayer, Robert Dickinson, Tom Ellis, Paul S. Freemont, Richard I. Kitney, Karen Polizzi, and Guy-Bart Stan, 131–49. London: Imperial College Press, 2012. https://doi.org/10.1142/9781848168640_0009.

Mesler, Bill, a James H Cleaves. *Stručné dějiny stvoření: věda a hledání počátku života*. Praha: Vyšehrad, 2020.

Nurse, Paul. *Biologie v pěti lekcích*. Praha: Argo a Dokořán, 2021.

Ord, Toby. *The Precipice: Existential Risk and the Future of Humanity*. New York: Hachette Books, 2020.

Phoenix, Chris, and Mike Treder. „Nanotechnology as Global Catastrophic Risk.“ In *Global Catastrophic Risks*, edited by Nick Bostrom, Milan M. Cirkovic, and Martin J. Rees. Oxford: Oxford University Press, 2011.

Preston, Christopher J. „The Promise and Threat of Nanotechnology: Can Environmental Ethics Guide Us?“ In *Nanotechnology Challenges*, edited by Joachim Schummer and Davis Baird, 234–37. Singapore: World Scientific Publishing, 2006. https://doi.org/10.1142/9789812773975_0012.

Secretariat of the Convention on Biological Diversity. „Synthetic Biology.“ *CBD Technical Series*, no. 82 (2015).

Senior, Andrew W., Richard Evans, John Jumper, James Kirkpatrick, Laurent Sifre, Tim Green, Chongli Qin, Augustin Židek, Alexander W. R. Nelson, Alex Bridgland, Hugo Penedones, Stig Petersen, Karen Simonyan, Steve Crossan, Pushmeet Kohli, David T. Jones, David Silver, Koray Kavukcuoglu, and Demis Hassabis. „Improved Protein Structure Prediction Using Potentials from Deep Learning.“ *Nature* 577 (2020): 706–10. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1923-7>.

Schiemann, Gregor. „Nanotechnology and Nature.“ In *Nanotechnology Challenges*, edited by Joachim Schummer and Davis Baird. Singapore: World Scientific Publishing, 2006.

Schrödinger, Erwin. *Co je život?* Brno: VUTIUM, 2004.

Smalley, Richard. „Response.“ In *Eric Drexler: Engines of Creation 2.0*. Los Angeles: Wowio Books, 2007.

Smalley, Richard. „Final Response.“ In *Eric Drexler: Engines of Creation 2.0*. Los Angeles: Wowio Books, 2007.

Trčka, Michal. „Filosofická reflexe syntetické biologie, etické a společenské výzvy.“ In *Biofyzika I*, editovali David Lukáš, Eva Kuželová Košťáková, Věra Jenčová a Michal Trčka, 152–66. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2020.

Trčka, Michal. „Život jako technologický produkt? Revoluce v biologii, on-line a zdarma.“ *Přítomnost*, 4. srpna 2021, <https://www.pritomnost.cz/2021/08/04/zivot-jako-technologicky-produkt/>.

Trump, Benjamin D., Christopher L. Cummings, Stephanie E. Galaitsi, Jennifer Kuzma, and Igor Linkov. „Synthetic Biology: Perspectives on Risk Analysis, Governance, Communication, and ELSI,“ In *Synthetic Biology 2020: Frontiers in Risk Analysis and Governance*, edited by Benjamin D. Trump, Christopher L. Cummings, Jennifer Kuzma, and Igor Linkov, 1–18. Cham: Springer, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27264-7>.

Whitesides, George M. „The Once and Future Nanomachine.“ *Scientific American* 285, no. 3 (2001): 78–84. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0901-78>.

Wiener, Norbert. *Kybernetika a společnost*. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1963.