

(2007) In: Kelemen, J., Kvasnička, V., Pospíchal, J. (eds.) Kognice a umělý život VII. Slezská univerzita, Opava, pp. 185-193.

Informácia a poznanie v biológii: od pojmových zmätkov k jasnému vymedzeniu

Ladislav Kováč

Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava. E-mail: kovacl@fns.uniba.sk

Abstrakt. Biológia vstúpila do postgénomovej éry. Predmetom výskumu sa stávajú na jednej strane mechanizmy fungovania molekulárnych strojov a na druhej strane komplikované interakcie v sieťach biologických entít na rôznych úrovniach organizácie. Pojmy informácia a poznanie, používané v biológii často a vágne, si vyžadujú prehodnotenie. To je predmetom tejto štúdie. Extenzívne je problému venovaná publikácia „Information and knowledge in biology: time for reappraisal“ (*Plant Signalling and Behavior* 2 (2007) 65-73).

Úvod

Termín informácia patrí medzi najčastejšie používané termíny v bežnej konverzácii, v prostriedkoch masovej komunikácie, ale aj vo vede. Koncom roku 2003 zadanie slova „informácia“ otvorilo na Googli $3,1 \times 10^8$ vstupov, vo februári 2007 $2,1 \times 10^9$ vstupov. Doba zdvojenia výskytu je okolo 13 mesiacov, čo možno porovnať s dobou zdvojenia výkonnosti počítačov, ktorá je podľa Moorovho zákona okolo 18 mesiacov. Bežne sa hovorí, že žijeme v informačnej spoločnosti, v ére informačnej explózie, že denne vyhľadávame a získavame ohromné množstvo informácií. V biológii sa organizmy často chápu ako informačné systémy, DNA ako nosič „genetickej informácie“ a mozog je označovaný za krajne výkonný informačný procesor. Vplyvný biológ John Maynard Smith napísal r. 2000 [1]: “A central idea in contemporary biology is that of information. Developmental biology can be seen as the study of how information in the genome is translated into adult structure and evolutionary biology of how the information came to be there in the first place.” Počiatkom r. 2007 pri vložení dvojice termínov „informácia“ a „biológia“ otvoril $1,73 \times 10^8$ vstupov.

Samotný termín „genetická informácia“ prešiel evolúciou, od idea genómu ako plánu, mapy, kódu až po predstavu, ktorá je dnes možno najviac favorizovaná, genómu ako receptu [1,2,3]. Bolo uverejnené nespočetné množstvo pokusov aplikovať teóriu informácie na analýzu genómov, receptorov, intra- a intercelulárnej komunikácie. Súčasný stav biológie si však vyžaduje znovupremyslenie vágneho a príliš širokého používania termínu informácia. O to sa pokúsili početní bádatelia (novšie publikácie, aj s prehľadom prác predchádzajúcich autorov, sú napr. ref. 4-8). Táto práca prináša ďalšie argumenty a aj návrhy ako termín presne vymedziť a komplementovať ho inými pojmami. Rozdiel medzi dátami, informáciou, inštrukciou, príkazom a poznaním môže mať význam pre používanie a zneužívanie termínu informácia v iných oblastiach prírodných vied, ale aj v kultúrnych (humánnych a sociálnych) vedách a v humanistike.

Rozpracovanie koncepcií

História používania termínu informácia

V antike sa pôvodne latinský výraz „informovať“ používal v zmysle tvárniť, dávať formu hmote. Tak výraz chápali aj stredovekí scholastici. V stredoveku sa význam výrazu rozšíril aj na formovanie mysle ľudí, na vyučovanie. Postupne sa slovo dostávalo do bežného jazyka. Dnešné výkladové slovníky vysvetľujú informáciu vo význame správ, noviniek, dát, vypovedaných vecí, jednotiek poznania. Až do polovice 20. storočia sa slovo vo vedeckom diskurze temer nevyskytovalo. Leo Szilard vo svojej zásadnej štúdii o vzťahu medzi entropiou a meraním termín „informácia“ nepoužil [9]. V druhej polovici 20. storočia pojem informácia prenikol priam triumfálne do vedy zásluhou kybernetiky, teórie komunikácie, teórii hier, teórii systémov, informatiky. Bežne sa používa v biológii, psychológii, sociológii, ekonómii, politológii. Často sa každý aspekt ľudského konania považuje za prejav zberu, spracovania, transformácie a ukladania informácie. Termín postupne strácal svoj antropocentrický status a schopnosť informačných transakcií začala byť pripisovaná bunkám, génom, strojom, molekulám. Dosiahli sme stav, kedy niektorí fyzici vyhlasujú že informácia je, vedľa hmoty a energie, tretou substanciou sveta a chápu všetky procesy vo svete ako procesovanie informácie.

Problém tak širokého pojmu je podobný, ako problém pojmu Boha: pojem, ktorý vysvetľuje všetko, nevysvetľuje nič. Význam takto široko chápaného pojmu je problematický v diskurzívnej vede, ktorá sa usiluje o porozumenie a zdieľanie tohto porozumenia. V podstate mu chýba vlastnosť, ktorá sa považuje za hlavnú hodnotu, ba priam predpoklad, vedeckého pojmu: nie je veličinou, ktorú možno merať a používať vo výpočtoch. Aj pre inštrumentálnu vedu, ktorá – na rozdiel od diskurzívnej vedy – manipuluje so svetom a vytvára stále nové artefakty so stále väčšou rýchlosťou, by mohol mať pojem informácie cenu len vtedy, ak sa zúži a obmedzí na merateľnú veličinu. Takýmto je pojem informácie v koncepcii Clauda Shannona.

Shannonova koncepcia informácie

Claude Shannon uverejnil svoje chápanie informácie v roku 1948 [10]. V jeho chápaní pojem informácie vytvára matematickú základňu pre teóriu komunikácie. Mal slúžiť optimalizácii a ekonomizácii prenosu správ. Shannonova informácia sa netýka kvalitatívneho aspektu správ. Umožňuje optimalizáciu prenosu na jednotku vynaloženej energie, na jednotku času, či na jednotku nákladov na čokoľvek, čo má praktický význam pre zhotovenie komunikačnej siete. V jeho dobe sa správy ešte prenášali telegraficky a poplatok za telegram nezávisel od obsahu konkrétnej správy, ale len od počtu slov, ktorými bola vyjadrená. No práve len počet slov alebo znakov, ktoré sa majú preniesť, určuje účinnosť prenosu a teda len tento počet zaujíma komunikačného inžiniera.

Shannonovo chápanie bolo popísané a popularizované v nespočetnom množstve článkov a kníh. Z hľadiska biológie toto chápanie asi najlepšie osvetľuje interpretácia Myrona Tribusa, ako ju predložil vo svojej knihe [11] a vo viacerých článkoch so spoluautormi [12,13]. Podľa Tribusa má subjekt vtedy správne sformulovanú otázku Q , ak vie vymenovať všetky možné odpovede na túto otázku, pričom nemusí vedieť, ktorá z odpovedí je správna. Ak sa niekto pýta bez toho, aby vedel aké sú možné odpovede, skôr len žiada o pomoc pri sformulovaní otázky. Keď pýtajúci kladie otázku Q , vždy má už o nej istú predbežnú znalosť, čo mu umožňuje pripísať pravdepodobnosti p_i všetkým možným odpovediam. Ak je odpoveď nemožná, jej $p = 0$, ak je odpoveď istá, jej $p = 1$. Shannon si vypožičal termín entropia

z termodynamiky, ako vhodnú metaforu, a definoval entropiu S v termínoch dobre sformulovanej otázky Q a znalosti X o Q :

$$S(Q|X) = -K \sum p_i \ln p_i$$

K predstavuje arbitrárny škálovací faktor a $\ln p_i$ je prirodzený logaritmus pravdepodobnosti p_i . Ak sa použije logaritmus so základom 2, $K = 1$ a jednotkou entropie je bit. Tak, ako v prípade entropie v termodynamike, aj tu je veľkosť S maximálna ak sú všetky pravdepodobnosti rovnaké. V tomto špeciálnom prípade môžeme X vyjadriť kvantitatívne (vyjadrením maximálnej neznalosti o Q , alebo ľahostajnosti voči všetkým možným odpovediam), ináč je X kvalitatívnym pojmom. V tomto chápaní je entropia S kvantitatívnou mierou neistoty, ktorú má pýtajúci sa. Shannon definoval informáciu I správy ako rozdiel medzi neistotami, aké má pýtajúci sa včasnšie než dostal správu a po prijatí správy:

$$I = S(Q|X) - S(Q|X')$$

X' je znalosť akú má pýtajúci sa po prijatí správy. Ak správa mala vzťah k otázke, X' je väčšia než bola X , aj keď vo všeobecnosti nie je vypočítateľná. Vo všeobecnosti možno považovať znalosť za kvantifikovateľnú premennú, ale vyjadrenú nie ako kardináonu ale ako ordinálnu veličinu, s použitím algebry nerovnín, vždy porovnávajúc s referenčným stavom. Ved' aj v teórii pravdepodobnosti môžeme hovoriť o pravdepodobnosti len vo vzťahu k priestoru pravdepodobností, ktorý si subjekt vopred stanoví.

Keď sa Shannonovo chápanie formuluje týmto spôsobom, je zrejmé, že hodnoty entropie a informácie, a aj samotný výskyt informácie, závisia od príjemcu správy, teda od pýtajúceho sa subjektu, ktorý stavia otázku a očakáva zmenšenie neurčitosti o možných odpovediach. Ak je subjektom jednoduchý organizmus, napríklad baktéria, všetko predbežné poznanie je zabudované ako výsledok evolučnej minulosti druhu. Ak je subjektom organizmus so schopnosťou učenia, evolučná znalosť je doplnená novými znalosťami, ktorá sa získala podmieňovaním behom individuálneho života. Ak je subjektom molekulárny senzor, s jednoduchou otázkou a dvoma alternatívnymi odpoveďami (zapnutý alebo vypnutý), maximálna entropia (v prípade že obe odpovede sú rovnako pravdepodobné) má veľkosť jediného bitu.

To isté platí pre ľudský subjekt ako príjemcu správy. Ak subjekt má príbuzného v nemocnici, ktorý bol práve operovaný, a ak má subjekt predbežnú znalosť o úspechu operácie vo veľkosti 50%, telefonická správa, v ktorej sa dozvie o výsledku operácie, bude niesť entropiu (a informáciu) s veľkosťou jediného bitu. Pre komunikačného inžiniera, ktorý má na starosti ekonomičnosť a spoľahlivosť telefonického spojenia medzi odosielateľom a príjemcom telefonátu, obsah konkrétnej správy, ba samotná jediná správa, je bez významu. Pre inžiniera sú významnými množina všetkých možných správ, ktoré môžu byť prenesené, vlastnosti prenosového kanála a spôsob akým sú správy zakódované. Pre inžiniera má teda relevantná entropia iné, podstatne vyššie, hodnoty.

Veľkosť informácie neurčuje len predbežná znalosť subjektu, ale aj jeho záujmy a úmysly. Ak sa ľudský pozorovateľ zaujíma o fyzikálny systém a ak je úmyslom určiť všetky kvantové stavy systému v určitom okamžiku, vyčerpávajúca správa, ktorú bude poskytovať príslušné meracie zariadenie – zatiaľ nepredstaviteľné – bude predstavovať ohromné rozdiely entropií a teda aj ohromne veľkú Shannonovu informáciu. Iba v tomto jedinečnom prípade by sa Shannonova entropia rovnala termodynamickej entropii. Možno by sa bolo dalo vyhnúť diskusiám a sporom o vzťahu medzi Shannonovou a termodynamickou entropiou, ku ktorých dochádzalo počas viac než pol storočia (prehľad ref. 14-17), keby bola všeobecne prijímaná samozrejmosť, že je to vždy subjekt s úmyslami a predbežnou znalosťou, ktorý určuje jemnosť granulácie sveta a tým aj veľkosť entropie a informácie.

Pojem informácie ako príklad „omylu pseudozovšeobecnenia“

„Omyl pseudozovšeobecnenia“ je bežnou logickou chybou (faláciou) ľudského poznávania. Je možno pozorovať rozličné objekty a udalosti, jemne medzi nimi diskriminovať a nachádzať spoločného menovateľa, ktorý vyjadruje zovšeobecnenie jednotlivých pozorovaní. No je tiež možno pozorovať rozličné objekty a udalosti hrubým spôsobom, bez postrehnutia rozdielov medzi nimi. V tomto druhom prípade hrubej granulácie nejde o zovšeobecnenie, ale o „pseudozovšeobecnenie“. Omylu pseudozovšeobecnenia sa dopúšťame vtedy, keď používame ten istý pojem pre popis rozdielnych entít.

Je vecou zásadnej dôležitosti, aby sa vo vedeckom diskurze obmedzil pojem informácie na Shannonovu informáciu. Treba zavrhnúť stotožňovanie pojmu „informácia“ s pojmami „dáta“, „poriadok“, „sekvencia“, „poznatok“, „inštrukcia“, „príkaz“, lebo je zmätočným. Do našich počítačov vkladáme dáta, nie informácie a počítače spracovávajú dáta, nie informácie. Masovo-komunikačné prostriedky neslúžia, až na ojedinelé výnimky, na vytváranie a prenášanie informácie. Databázy sekvencií nukleových kyselín a proteínov sú jednoducho skladišťami dát a nie informačnými databázami.

Je istá analógia medzi prácou a teplom na jednej strane a informáciou na druhej strane. Ako sa zdôrazňuje v rigoróznejšej učebnici termodynamiky [18], práca a teplo majú síce rozmer energie, ale nie sú energiou, sú dvomi spôsobmi prenosu energie medzi systémom a jeho prostredím. Práca a teplo nie sú „veci“, sú to procesy medzi počiatočným a konečným stavom energie systému. Čosi podobné možno povedať o informácii. Informácia o určitej veci alebo udalosti je rovná rozdielu medzi konečnou a počiatočnou znalosťou, aké má subjekt o danej veci alebo udalosti. To sa dosahuje zbieraním, výberom a spracovaním dostupných dát takým spôsobom, ktorým sa popreskupujú pravdepodobnosti možných odpovedí na správne sformulovanú otázku. Práca a teplo nie sú statickými entitami, nikde sa negenerujú a nikde sa neuchovávajú, sú dvoma rozdielnymi spôsobmi transformácie energie. Práve tak je chybou hovoriť o generovaní, spracovávaní a uchovávaní informácie. Akokoľvek módnou je veta „zmeniť dáta na informácie“, je nesprávna, ak by mala implikovať, že informácia je niečím „objektívnym“, nezávislým od predbežnej znalosti konkrétneho subjektu.

Kvantita nejakého údaju (ale nie jeho kvalita, dáta môžu byť nepresné, chybné alebo nezmyselné), zaznamenaná vo forme sekvencie znakov, môže byť preložená do sekvencie dvoch číslíc, 0 a 1 a ako taká vyjadrená v bitoch. Ak by sa subjekt zaujímal o sekvenciu znakov v pôvodnom zázname a ak by nemal nijakú predbežnú znalosť, jeho neurčitosť by bola zmenšená o rovnaký počet bitov. Len tento proces zmenšenia neurčitosti a teda nárastu znalosti subjektu predstavuje informáciu. Samotný záznam nie je informáciou. S odvolaním sa na Schrödingera [19] nazvime záznam skriptom (pôvodné slovo Schrödingera bolo „code-script“). Úplná znalosť o sekvencii báz v nukleovej kyseline zníži na nulu pôvodnú neistotu o sekvencii biochemika, ktorého záujmom bolo poznať sekvenciu týchto báz. No sekvencia báz v tej istej nukleovej kyseline zmenší neistotu bunkových subjektov, ktoré existujú na inej úrovni než ľudský subjekt, kvantitatívne celkom ináč než neistotu biochemika. Vezmime si restriktívny enzým EcoRI ako bunkový subjekt. Enzým EcoRI možno považovať za senzor, ktorý pridáva význam jedinej sekvencii báz, GAATTC. Veľkosť neistoty EcoRI ako subjektu je iste celkom iná ako veľkosť neistoty biochemika, ktorý sekvenuje DNA. Táto výhrada platí aj pre pôsobivé snahy pochopiť molekulárne rozpoznanie pomocou matematiky informačnej teórie (napr. ref. 20, 21 z mnohých iných): kvantitatívna analýza sekvencií a frekvencií báz nemá nijaký vzťah ku chémii molekulárneho rozoznania, ktoré určuje afinitu a špecificitu rozpoznávacieho procesu.

Ak je informácia záležitosťou dobre formulovanej otázky, takú otázku môže stavať len subjekt, ktorý už existuje. Ak sa systém, ako potenciálny príjemca správy, iba konštruuje, nemá zmysel pripisovať mu neistotu. Otázka „čo bude ďalej nasledovať?“ , ak ju stavia

system, ktorý sa ešte len konštruuje, nie je dobre formulovanou otázkou. Takže konštruovanie systému nespočíva v prijímaní informácií, ale, ak systém má svojho dizajnéra, v prijímaní inštrukcií. Pritom inštrukcie môžu byť zaznamenané ako skript a množina inštrukcií môže predstavovať algoritmus konštrukčného procesu. Ako skripty, inštrukcie môžu byť merané a vyjadrené v bitoch, ale to neznamená, že inštrukcia je rovná informácii, či dokonca totožná s informáciou. Brooks a Wiley [22] navrhli výraz „inštrukčná informácia“ a tvrdili, že ona „comprises a physical array whose informational properties depend only on the properties internal to the system in question“. S takým chápaním by sme mali reifikáciu nielen informácie, ale aj inštrukcie. Inštrukcia nemá nič do činenia s neurčitou a pravdepodobnosťou; závisí od subjektu a v skutočnosti je skôr protikladom informácie. V rovnakom zmysle dieťa, ktoré sa učí v škole, zriedkavo prijíma informácie. Prijíma príkazy a hlavne inštrukcie. To sú však len tri z početných spôsobov akými ľudský subjekt spracováva dáta, ktoré sa nachádzajú v jeho prostredí.

Z tejto analýzy vyplýva, že označenie nukleových kyselín ako „nosičov informácie“ je nesprávne. Už dlho sa tiahnu špekulácie, v podstate neplodné, či nukleové kyseliny sú „nosiče“ dát, programov, informácií atď. Podľa Douglasa Hofstadtera v prípade nukleových kyselín nielen programy a dáta sú zložito prepletené dohromady, ale do tejto zložitej fúzie sú zahrnuté aj interpretátor programov, fyzikálny procesor, ba aj jazyk [23]. Od čias, čo Hofstadter napísal svoju knihu, záležitosť nebola objasnená, ale ešte viac zamotaná. Celkom isto nukleové kyseliny nefungujú ako sklad inštrukcií. Už v 1968 Conrad Waddington poznamenal, že genotyp je ako súbor axióm, napríklad Euklidových, a fenotyp je ako trojväzkové pojednanie o euklidovskej geometrii [24].

Hofstadter poukázal na „zmešovanie rovín v bunke“. No k miešaniu rovín dochádza aj na iných, nižších i vyšších, hierarchických úrovniach. Na každej úrovni je ale subjekt, ktorý buď stavia otázky špecifické pre danú úroveň, alebo prijíma príkazy ako má konať. Takže vlastne povaha subjektu si vyžaduje vyjasnenie.

Subjektibilita: Janusova tvár druhej vety termodynamiky

Často sa konštatuje, že druhá veta termodynamiky je najdôležitejším zákonom prírody. Je hlavným určovateľom ireverzibility diania, „šípky času“, evolúcie. Bolo už poukázané na to, že druhá veta je len špecifickým prípadom všeobecnejšieho princípu indiferencie [25]. V prírode druhá veta termodynamiky platí v prítomnosti síl. Sily prírody sú poväčšine asociatívne. Malé hmotné entity sa spájajú, vytvárajú väčšie: premena potenciálnej energie na termálnu, disipácia energie, je sprevádzaná agregáciou hmoty [26]. Navyše, viacerí pozorovatelia v posledných desaťročiach dospeli k záveru, že vytváranie hmotných štruktúr je spôsobom ako urýchliť proces vynulovania gradientov energie vo vesmíre. To viedlo Schneidera a Kaya k reformulácii druhej vety termodynamiky [27]. Hoci druhá veta je konštatovaním o narastaní neusporiadanosti, hrá aj centrálnu rolu vo vytváraní usporiadanosti. Keď sú termodynamické systémy vystavené silám v prostredí a tým posúvané ďalej od rovnováhy, robia všetko pre to, aby pôsobili proti pôsobiacim silám. Keď sa pôsobiacie gradienty zväčšujú, zväčšuje sa aj schopnosť systému stavať sa proti posúvaniu ďalej od rovnováhy. To sa prejavuje štruktúrovaním systému: štruktúrovanie je spôsob ako zvýšiť rýchlosť disipácie. Označenie „disipatívne štruktúry“, ktoré zaviedol Prigogine so spolupracovníkmi, nadobúda, podľa Schneidera a Kaya, nový zmysel. Neznamená len disipáciu hmoty a energie, ale aj disipáciu gradientov. Disipatívne štruktúry sú jednoducho disipátormi gradientov.

Podobné idey vyjadrili v rôznych podobách aj Rod Swenson [28], Stuart Kauffman [29] a Eric Chaisson [30]. A vlastne všetky tieto formulácie anti-cipoval Alfred Lotka svojim

zákonom maximálneho prietoku energie systémom organickej prírody, ktorý nazval zákonom evolúcie [31].

V dôsledku jednosmerného pôsobenia druhej vety termodynamiky je vesmír plný termodynamických systémov, ktoré intenzívne a rýchlo disipujú energiu a hmotu vo svojom prostredí. Pritom disipácia umožňuje systémom, aby sa samé ostávali nezmenené a aby zväčšovali svoju komplexnosť. Swenson nazval takéto systémy „autokatakinetickými“ [28] a Kauffman ich označil ako „autonómne agenty“ [29]. Nielen že si udržujú svoju onticitu, ale aj zväčšujú svoje rozmery, odštepujú sa (u živých systémov v podobe reprodukcie), rozširujú do nových oblastí a vyhľadávajú nové gradienty energie pre disipáciu. Práca použitá na udržiavanie permanencie, onticity, odpovedá „ontickej práci“. Nie všetky také systémy sú disipatívnymi štruktúrami. Sú aj konzervatívne štruktúry, konštrukcie, ako organizované systémy, čo svoju stabilitu a svoju vzdialenosť od rovnováhy udržujú zásluhou vysokých kinetických bariér, ktoré bránia alebo spomaľujú ich deštrukciu a disipáciu. Takéto štruktúry, disipatívne i konzervatívne, ktoré uchovávajú svoju permanenciu v prostredí v ktorom beží disipácia, nazývame subjektami. To nie je metafora, ale konceptuálny primordiál, definícia. Tendenciu sveta, plynúca z druhej vety termodynamiky, vytvárať subjekty, možno označiť ako subjektibilitu. Ak chceme mať tretiu substanciu sveta, vedľa hmoty a energie, nie je ňou informácia, ale subjektibilita.

Poznanie ako termodynamická hĺbka a pracovná schopnosť

Špecifickým druhom Swensonových autokatakinetických systémov, či Kauffmanových autonómnych agentov, sú živé systémy. Ako vhodne vyjadril Konrad Lorenz [32], “Life is an eminently active enterprise aimed at acquiring both a fund of energy and a stock of knowledge, the possession of one being instrumental to the acquisition of the other. The immense effectiveness of these two feedback cycles, coupled in multiplying interaction, is the pre-condition, indeed the explanation, for the fact that life had the power to assert itself against the superior strength of the pitiless inorganic world.”

Alfred Lotka cituje Henriho Poincarého že je ľahko vložiť zrnko ovsa do vreca naplneného zrnami pšenice, ale skoro nemožné ho po rozmiešaní zas zo zmesi vybrať [31]. Poincaré i Lotka to uviedli ako príklad modelu ireverzibilných procesov. Musí sa vykonať veľa práce, veľa energie zdisipovať, keby sa z vreca vyberalo zrno po zrne. Ak by sme však mali meracie zariadenie, ktoré by dokázalo odlíšiť zrno ovsa od zrna pšenice a aj presne určiť jeho polohu vo vreci, vybratie jediného zrna ovsa by nebolo o nič ťažšie než vybratie akéhokoľvek jedného zrna z celého vreca plného pšeničných zrn. Meracie zariadenie by nieslo zabudované poznanie o tom, ako odlíšiť oba druhy zrn. Uvažujme dvoch autonómnych agentov, ktorí by mali k dispozícii len obmedzené množstvo energie a mohli urobiť len obmedzené množstvo práce, pričom by prežitie oboch agentov záviselo od toho jediného zrna ovsa. Zrejme by podstatne väčšiu šanca prežitia mal ten agent, čo by bol schopný rozpoznať, lokalizovať a vybrať jediné zrno ovsa, než ten druhý agent, čo by náhodne vyberal zrno po zrne. Poincarého príklad ukazuje, akým dôležitým je zabudované poznanie pre prežitie sdujektu v prostredí.

Poznanie, zabudované v systéme, odpovedá jeho epistemickej komplexnosti [33]. Jej rast určuje nasmerovanie biologickej evolúcie. Podľa Hansa Kuhna, v priebehu evolúcie organizmy získavajú na kvalite [34]. Kvalita predstavuje poznanie a jej mierou je celkový počet bitov, ktoré boli odhodnené, kým sa dosiahlo evolučné štádium, ktoré sledujeme. Kuhnova miera poznania sa podobá miere komplexnosti, pre ktorú Seth Lloyd a Hans Pagels zaviedli označenie „termodynamická hĺbka“ [35]. Komplexnosť veci stotožnili s množstvom termodynamického úsilia potrebného na vytvorenie tejto veci. Miera komplexnosti makroskopického stavu d systému, ktorý dospel do tohto stavu i -tou možnou trajektóriou je -

$k \cdot \ln p_i$, kde p_i je pravdepodobnosť že systém došiel do d po i -tej trajektórii a k je arbitrárna konštanta. Hĺbku stavu definovali ako

$$\mathcal{D}(d) = -k \cdot \ln p_i$$

Arbitrárna konštanta bola postavená ako rovná Boltzmannovej konštante pre systémy, ktorých po sebe idúce konfigurácie možno popísať vo fyzikálnom priestore štatistickej mechaniky. V tomto prípade hĺbka sa nazýva termodynamickou hĺbkou a odpovedá entropii, ktorá bola prenesená behom evolúcie na iné stupne voľnosti než sú tie, ktoré treba na špecifikáciu konečného stavu d systému. Alebo, inými slovami, termodynamická hĺbka je rovná množstvu energie, ktorá bola disipovaná v minulosti, ako sa systém vyvíjal po špecifickej trajektórii až po jeho súčasný stav.

Čo je podstatné na tejto miere komplexnosti je fakt, že súčasný výzor objektu nehovorí nič o jeho evolučnej minulosti a teda o jeho komplexnosti. Nedostačuje ani atómová štruktúra, ani sekvencia znakov ktoré systém popisujú, ani náčrt, ktorý objekt špecifikuje. Seth Lloyd uvádza tento ozrejmujúci príklad [36]: Hrad z piesku postavený dieťaťom má oveľa väčšiu termodynamickú hĺbku než piesočná duna. Keď stanovujeme termodynamickú hĺbku hradu z piesku musíme brať do úvahy nie iba prírodné procesy, ako geologické a meteorologické sily, ktoré vytvorili piesočnú dunu, ale aj vedomé konanie dieťaťa, ba dokonca aj evolučné procesy, ktoré v poslednej inštancii viedli k tomuto dieťaťu. Keď nahradíme termín „termodynamická hĺbka“ termínom poznanie, okamžite pochopíme epistemologický význam tohto príkladu.

Poznanie, obsiahnuté v epistemickej komplexnosti, znamená však aj niečo viac než len termodynamickú hĺbku. Poznanie, zabudované do systému, znamená aj schopnosť konať ontickú prácu, ktorá je potrebná pre udržovanie permanencie, onticitu, systému. A tiež konať epistemickú prácu: pociťovať, merať, zaznamenávať vlastnosti prostredia, aby bolo možno eliminovať ich deštruktívne účinky a v prípade systému s veľkými zabudovanými znalosťami aj tieto účinky predvídať. Takže v epistemickej komplexnosti sú „zbalené“ dva procesy: jeden, týkajúci sa evolučnej minulosti a druhý, zahrňujúci celkovú množinu budúcich potenciálnych činností. Evolúcia ako prehlbovanie termodynamickej hĺbky je, z iného uhla pohľadu, procesom trvalého zväčšovania vzdialenosti od termodynamickej rovnováhy ako miera epistemickej komplexnosti [33].

Poznanie, ktoré je nesené v artificálnych systémoch, zhotovených človekom, má ešte ďalšiu pozoruhodnú vlastnosť: jeho veľkosť je funkciou nie iba tvorcu artefaktu, ale aj jeho konzumenta. Všimnime si portréty poetky Anny Achmatovej, nakresleného Amedeom Modiglianim [37] (Obr. 1). Jeho epistemickú komplexnosť predstavujú majstrovské schopnosti výtvarníka, ale aj zložité účinky, ktoré ma obraz na jeho diváka. No keby sme túto kresbu, pozostávajúcu z pár jednoduchých čiar, digitalizovali a vyjadrili počtom bitov, nezachytíme nič z jej bohatstva a pôsobivosti. Treba zdôrazniť, že to isté platí o epistemickej komplexnosti vajíčka. Nezahrňuje len skript sekvencií DNA, odpovedajúci génom čo kódujú proteíny, ale aj iné časti genómu a predpokladané, hoci dosiaľ v podstate neznáme, dedičné frejmy, ako organizujúce komponenty membrán, cytoskelet a proteíny nukleozómu. V podstate tiež zatiaľ nič nevieme o epigenetických pravidlách [38], ktoré sa môžu postupne rozvíjať počas embryogenézy, počínajúc od zdedenej asymetrie bunkových komponentov vajíčka.

Biologické druhy ako hlavné záznamníky evolučne získaného poznania

Dominancia paradigmy informácie má svoju paralelu s dominanciou génocentrizmu, idey, podľa ktorej hlavnou jednotkou prirodzeného výberu, a teda aj hlavným aktérom evolúcie, je individuálny gén, alebo, všeobecnejšie, individuálny replikátor. Podľa populárnej predstavy Richarda Dawkinsa, gény (a mémy) sú samoreplikujúce entity, ktoré medzi sebou

navzájom súťažia adaptáciou, ktorá zväčšuje ich vlastnú replikáciu [39]. Dawkins sa stavia proti každej predstave, čo by pripisovala biologické adaptácie pôsobeniu selekčných procesov na vyššej úrovni organizácie – organizmov, skupín, populácií, alebo druhov. Len pomaly je koncepcia génocentrizmu vytláčaná koncepciou mnohoúrovňovej selekcie [40, 41]. Najradikálnejšia bola predstava Stephena Goulda, podľa ktorého „darwinovské individuá“ možno identifikovať na všetkých úrovniach biologickej hierarchie, počínajúc génmi, cez organizmy a démy po druhy [42]. Všetky tieto individuá sú hierarchicky „uhniesdené“ jeden v druhom. Pre Goulda je zvlášť dôležitá selekcia na úrovni druhov. Gould a Lloyd napísali, že „Manifesting the resilience of our usual metaphors for stubborn persistence the formerly anathematized concept of supraorganismal selection has emerged from previous calumny to a new status of intense discussion and growing importance“ [43].

Z epistemologického hľadiska myšlienka, že hlavnými hráčmi v evolučnej hre sú druhy, dáva zmysel, hoci táto predstava, hlásaná biológmi „pred-génocentrickej“ éry, napr. Konradom Lorenzom [44], bola neskôr odmietnutá, ba aj zosmiešňovaná. Individuálne organizmy možno chápať ako kópie poznania, ktoré sa nahromadilo v evolúcii konkrétneho druhu, a záznamníkom tohto poznania je epistemická komplexnosť konkrétneho druhu a nie jeho individuálnych členov. Lloyd a Pagels opodstatnene argumentujú, že komplexita objektu sa podstatnejšie nezväčšuje s počtom jeho kópií [35]: „Seven bulls need not be much more complex than one bull. It took billions of years for the earth to evolve one bull; but one bull and a few compliant cows will produce seven bulls relatively speedily.“

Z pohľadu Tribusovho popisu informácie biologický druh ako celok nesie v sebe konštantnú množinu dobre formulovaných otázok a tiež konštantnú množinu možných odpovedí na každú z týchto dobre formulovaných otázok. Má tiež konštantný počet sensorov. Individuálne organizmy sú iba kópiami toho istého ontického a epistemického systému. Každý biologický druh je epistemicky uzatvorený, a to ako sémanticky – tak argumentujú Rosen [45] a Pattee [46] – tak aj syntakticky: pre každý druh sú pravidlá, podľa ktorých sa spracovávajú dáta zo sensorov, špecifické a nemenné. Druhy sú aj reprodukčne uzatvorené, čo, podľa Goulda a Lloydovej, sa podobá uzatvorenosti imúnneho systému každého individuálneho organizmu [43]. Imúnny systém je, podľa Jerneho [47] a Edelmana [48], hermeticky uzamknutý systém, ktorý obsahuje všetky možné odpovede na vonkajší antigénový svet.

Keď chápeme život týmto spôsobom, je zrejmé, že v živom svete je podstatne menej informačných transakcií, než sa obvykle predpokladá. V prípade jednoduchého druhu, ktorý sa nevie učiť, stimuly z prostredia fungujú iba ako spúšťače predpripravených odpovedí. U druhov schopných učenia, dáta získané z prostredia slúžia iba k tomu, aby formou informácie presúvali pravdepodobnosti možných odpovedí, či, inými slovami, aby vybrali jednu odpoveď k fixnej množiny možných odpovedí. To platí aj pre organizmy, čo majú centrálny nervový systém. Dáta, vnímané a spracované, sa využívajú na aktualizáciu hypotéz, čo sú trvalo prítomné v mozgu a na vybratie jednej z preformovaných alternatív konkrétnej činnosti. Friedrich Hayek to už predvídal 1952, keď napísal [49]: „An event of entirely new kind, which has never occurred before, and which sets up impulses which arrive in the brain for the first time, could not be perceived at all.“

No individuálne organizmy nie sú identické kópie nejakej jedinečnej platónskej podoby druhu. Slúžia ako zariadenia, ktorými druh „preskúmava“ nové, neobjavené aspekty prostredia. V termínoch Tribusovho modelu, niektoré mutácie predstavujú prídavky k množine možných odpovedí na existujúcu otázku. Veľká dedičná zmena môže meniť samotnú otázku alebo pridať novú k existujúcej množine otázok. Vlastne špeciácia možno spočíva v modifikácii kvality a kvantity otázok, ktoré živé systémy kladú svojmu prostrediu.

Dobre sformulovanú otázku – teda otázku s kompletnou množinou možných odpovedí – možno nazývať „inkvizitornou otázkou“. Nepoznanie subjektu, čo kladie inkvizitornú otázku,

vyjadruje neistotu. Je to stav, keď subjekt vie, že vie, ale má neistotu ohľadom spoľahlivosti a presnosti toho, čo vie. V neobvyklých situáciách, najmä nebezpečia, organizmus môže stavať aj otázky u ktorých nemožno vymenovať všetky možné odpovede; také otázky možno nazývať „exkvizitórnymi“. Nepoznanie za exkvizitórnou otázkou odpovedá zmätku. Subjekt vie, že nevie a je v stave frustrácie. Subjekt, ktorý nevie, že nevie, je v stave ignorancie. Otázky, ktoré tomuto stavu odpovedajú, sú nezmyselné. Môžeme urobiť klasifikáciu nepoznania a poznania (Tab. 1).

Zmenšenie neistoty, zviazané s inkvizitórnymi otázkami a s vlastným (*intrinsic*) poznaním, vlastne ani nie je celkom novým poznaním. Len spresňuje existujúce poznanie. Len v tomto prípade možno hovoriť o prijímaní informácie. Pre proces, ktorý poskytuje nevlastné (*extrinsic*) poznanie, možno zaviesť, v analógii s informáciou, novotvar „exformácia“. Nadbytočné poznanie je zvláštny typ poznania, ktorý je špecifický pre jediný druh na Zemi, pre *Homo sapiens*. Je to poznanie, ktoré sa vytvára behom kultúrnej evolúcie.

Záver

Prehnané používanie terminológie informácie prirodzene podporovalo metaforu života ako počítača. V kognitívnych vedách ešte naďalej je počítač obľúbeným modelom mysle, a života vôbec. No život, aký na Zemi poznáme, prirodzený život (n-life), je chemickým systémom a poznávanie je vlastnosťou chemického systému [50]. Umelý život (a-life) nemusí spočívať na chemických princípoch. Chemické interakcie sa fundamentálne odlišujú od iných typov interakcií, akými je napríklad aj kombinovanie súčastí Lego stavebnice. Spojenie dvoch súčastí Lega neprivedie kvalitatívnu zmenu, ale zlúčenie molekúl vodíka a kyslíka vytvorí čosi nové, čo – aspoň v popise akého je zatiaľ ľudstvo schopné – nebolo zapísané vo vlastnostiach jeho prekursorov. Chémia je vedou emergencií. Elektromagnetické interakcie medzi atómami vytvárajú bohatstvo molekúl s vlastnosťami kvalitatívne inými než majú ich zložky. Molekuly sa kombinujú a/alebo asamblujú do supramolekulárnych štruktúr, ktoré fungujú ako molekulárne stroje. Bohatstvo chemických novínok, na molekulárnej i nadmolekulárnej úrovni, nutný dôsledok druhej vety termodynamiky, robí z evolúcie života permanentnú módnou prehliadku. Prirodzený výber nie je tvorcom novostí, ale len odstraňovateľom nepodarkov, „vytŕhačom buriny“. Vyjadrené poeticky, slúži na vyberanie najvydarenejších veršov z poémy života.

Pojem informácie a metafora počítača sú úzko zviazané s konceptom géocentrizmu a metaforou sebeckého génu. Thomas Kuhn popísal dynamiku vedy ako výmenu paradigiem; uviedol ako príklad výmenu Ptolemaiovej geocentrickej paradigmy Kopernikovou paradigmou heliocentrizmu [51]. Konceptia géocentrizmu prechádza možno podobnou evolúciou ako prešla v minulosti Ptolemaiova paradigma: aby vysvetlila nové pozorovania, bolo treba pridávať stále nové epicykly. Jednoduchšia paradigma Kopernika epicykly sa obišla bez epicyklov. Metafory sebeckých génov, informácie ako vlastnosti sveta a hlavnej črta života, mozgu ako počítača, ako by stále viac získavali ptolemaiovský charakter. To však neznamená, že by nová „kopernikovská“ paradigma mala byť jednoduchou. Naopak, biologický „ptolemaizmus“ sa možno opustí preto, že je príliš, hoci elegantne, jednoduchým. Biológia sa teraz sústreďuje na svet veľkej komplexnosti. Je to svet, ktorý leží za Kantovými bariérami [33].

Zjavné je to na ťažkosti, s akou sa stretávame, ak chceme popísať poznanie chápané ako termodynamickú hĺbku. Dynamika minulosti, prejdená evolučná trajektória, a zároveň dynamika budúcnosti, množina možných činností, sú „zmrazené“ do podoby, ktorá sa možno nedá vyjadriť nijakým lineárnym skriptom. Erwin Schrödinger to predvídal vo svojej prelomovej knihe „Čo je život?“ [19]. Pokúsil sa predstaviť genetický „code-script“ ako „four-dimensional pattern“, ktorý v sebe zahŕňa celú štruktúru vývinu jednotlivca i jeho

fungovania v zrelom stave. “Law-code”, “executive power”, “architect’s plan” and “builder’s craft” – všetko v jednom. Odvážil sa k prorockému konštatovaniu: “This is a marvel – than which only one is greater; one that, if intimately connected with it, yet lies on a different plane. I mean the fact that we, whose total being is entirely based on a marvelous interplay of this very kind, yet possess the power of acquiring considerable knowledge about it. I think it is possible that this knowledge may advance to little short of a complete understanding – of the first marvel. The second may well be beyond human understanding.”

Je možné, že biológia sa dostala do podobného štádia ako kvantová mechanika. Howard Pattee, ktorý po dlhú dobu hlásal, že klasický vzťah medzi štruktúrou a funkciou v biológii potrebuje dva spôsoby popisu, z ktorých ani jeden nie je odvoditeľný z druhého alebo naň redukovateľný [52], si zasluhuje kredit za svoju predvídavosť. Ako sú interpretácie elektrónu ako častice a ako vlny komplementárne, veci a udalosti odhaľované súčasnou biológiou si možno budú vyžadujú popis spočívajúci na Bohrovom princípe komplementarity [53].

Literatúra

- [1] Maynard Smith, J.: The concept of information in biology. *Philosophy of Sci.* **67** (2000) 177-194
- [2] Dawkins, R.: *The blind watchmaker*. New York: Norton, 1987
- [3] Williams, G.C.: *The pony fish glow*. New York: Basic Books, 1997
- [4] Stuart, C.I.J.M.: Bio-informationel equivalence. *J. Theor. Biol.* **113** (1985) 611-636
- [5] Emmeche, C., Hoffmeyer, J.: The semiotic metaphor in biology. *Semiotica* **84** (1991) 1-42
- [6] Conrad, M, Marijuan, P.C. (eds.): Proceedings of the First conference on foundations of information science. From computers and quantum physics to cells, nervous systems, and societies. *BioSystems* **38** (1996) 87-266
- [7] Markoš, A.: *Readers of the book of life*. Oxford: Oxford University Press, 2002
- [8] Capurro, R., Hjørland, B.: The concept of information. *Ann. Rev. Information Sci. Technol.* **37** (2003) 343-411
- [9] Szilard, L.: Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingreifen intelligenter Wesen. *Zeitschrift für Physik* **53** (1929) 840-856
- [10] Shannon, C.E.: A mathematical theory of communication. *Bell. Syst. Tech. J.* **27** (1948) 379-423, 623-656
- [11] Tribus, M.: *Thermostatistics and thermodynamics*. Princeton: Van Nostrand, 1961
- [12] Tribus, M, McIrwine, E.C.: Energy and information. *Sci. Amer.* **224** (2) (1971) 179-190
- [13] Costa de Bauregard, O, Tribus, M.: Information theory and thermodynamics. *Helv. Phys. Acta* **47** (1973) 238-247
- [14] Pierce, J.R.: *An introduction to information theory*. 2nd edition. New York: Dover, 1980
- [15] Leff, H.S, Rex, A.F. (eds.): *Maxwell’s demon. Entropy, information, computing*. Bristol: Hilger, 1990
- [16] Yockey, H.P.: *Information theory and molecular biology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992
- [17] Adami, C.: *Introduction to artificial life*. New York: Springer, 1998
- [18] Bazarov, I.P. *Termodinamika*. Moskva: Vysšaja škola, 1983
- [19] Schrödinger, E. *What is life?* Cambridge: Cambridge University Press, 1944
- [20] Berg, O.G., von Hippel, P.H.: Selection of DNA binding sites by regulatory proteins. *J. Mol. Biol.* **193** (1987) 723-750
- [21] Schneider, T.D.: Measuring molecular information. *J. Theor. Biol.* **201** (1999) 87-92

- [22] Brooks, D.R., Wiley, E.O.: *Evolution as entropy*. Second edition. Chicago, IL: The University of Chicago Press, 1986
- [23] Hofstadter, D.R.: *Gödel, Escher, Bach. An eternal golden braid*. Harmondsworth: Penguin Books, 1980
- [24] Waddington, C.H.: The basic ideas of biology. In: Waddington, C.H. (ed.) *Towards a theoretical biology*. vol.1: Prolegomena. Edinburgh: Edinburgh University Press, 1968
- [25] Kováč, L.: Symbiologika. Od géocentrizmu ku noocentrizmu. V: Kelemen, J., Kvasnička, V., Pospíchal, J. (eds.): *Kognice a umělý život V*. Vol. 1, 271-282
- [26] Wicken, J.S.: *Evolution, thermodynamics, and information*. New York: Oxford University Press, 1987
- [27] Schneider, E., Kay, J.: Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. *Mathematical and Computer Modeling* **19** (1994) 25-48
- [28] Swenson, R. Spontaneous order, autocatakinetic closure, and the development of space-time. *Annals N.Y. Acad. Sci.* **901** (2000) 311-319
- [29] Kauffman, S.: *Investigations*. New York: Oxford University Press, 2000
- [30] Chaisson E.: *Cosmic evolution: the rise of complexity in nature* . Cambridge, MA: Harvard University Press. 2001
- [31] Lotka, A.J.: *Elements of mathematical biology*. New York: Dover, 1956
- [32] Lorenz, K.: *Behind the mirror*. New York: Harcourt Brace Jovanovich, 1977
- [33] Kováč, L.: Fundamental principles of cognitive biology. *Evolution and Cognition* **6** (2000) 51-69
- [34] Kuhn, H. Origin of life and physics: Diversified macrostructure – Inducement to form information-carrying and knowledge-accumulating systems. *J. Res. Develop.* **32** (1988) 37-46
- [35] Lloyd, S., Pagels, H.: Complexity as thermodynamic depth. *Annals of Physics* **188** (1988) 186-213
- [36] Lloyd, S.: The calculus of intricacy. *The Sciences* Sept/Oct **1990**: 38-44
- [37] Belsky Lagazzi, I.: Anna Achmatova. <http://www.larici.it>, 1990
- [38] Lumsden, C.J., Wilson, E.O.: *Genes, mind and culture. The coevolutionary process*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1981
- [39] Dawkins, R.: *The selfish gene*. Oxford: Oxford University Press, 1976
- [40] Sober, E., Wilson, D.S.: *Unto others. The evolution and psychology of unselfish behavior*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1998
- [41] Michod, R.E.: *Darwinian dynamics. Evolutionary transitions in fitness and individuality*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1999
- [42] Gould, S.J.: *The structure of evolutionary theory*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2002
- [43] Gould, S.J., Lloyd, E.A.: Individuality and adaptation across levels of selection: How shall we name and generalize the unit of Darwinism. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.* **96** (1999) 11904-11909
- [44] Lorenz, K.: *On aggression*. London: Methuen, 1966
- [45] Rosen, R.: *Life itself*. New York: Columbia University Press, 1991
- [46] Pattee, H.H.: Evolving self-reference: matter, symbols and semantic closure. *Communication and cognition* **12** (1995) 9-27
- [47] Jerne, N.K.: The generative grammar of the immune system. *Science* **229** (1985) 1057-1059
- [48] Edelman, G.: *Bright air, brilliant fire: On the matter of mind*. New York: Basic Books, 1992
- [49] Hayek, F.A.: *The sensory order: An inquiry into the foundations of theoretical psychology*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1952

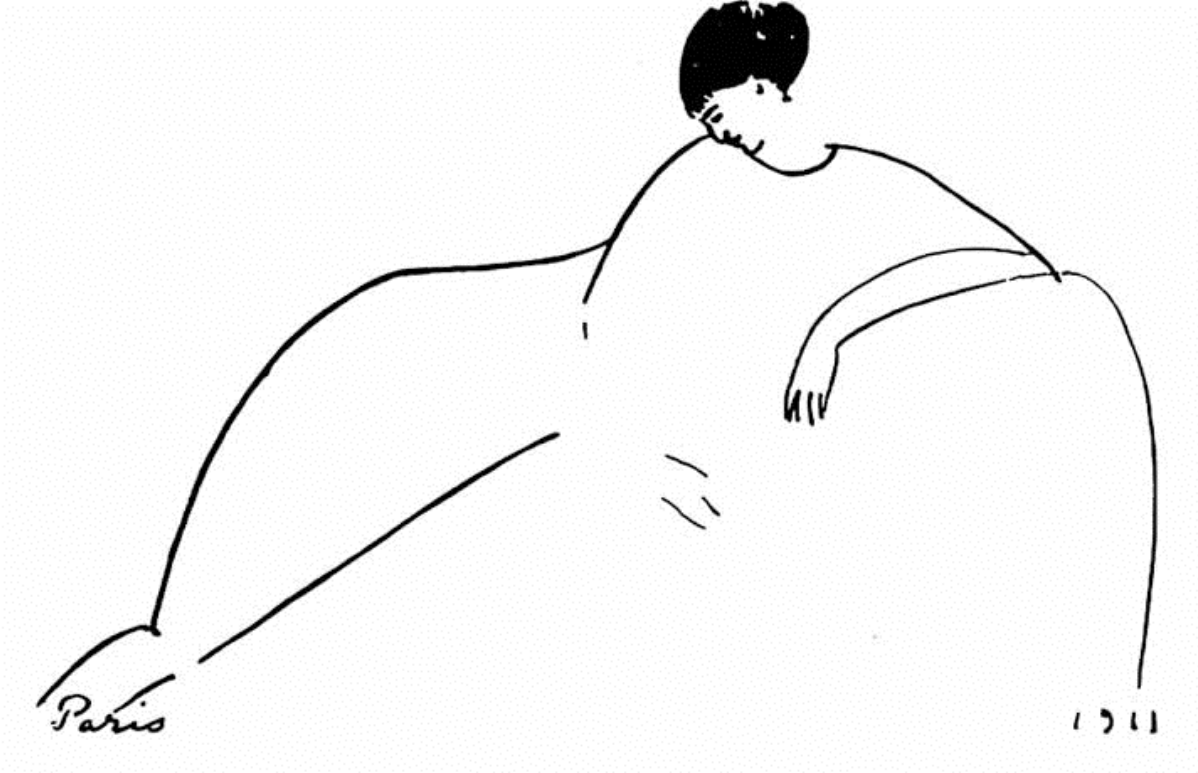
- [50] Kováč, L.: Life, chemistry and cognition. *EMBO Reports* **7** (2006) 562-566
- [51] Kuhn, T.: *The structure of scientific revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1970
- [52] Pattee, H.H.: The complementary principle in biological and social structures. *J. Soc. Biol. Structures* **1** (1978) 191-200
- [53] Bohr, N.: *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*. Vol. I. Braunschweig: Vieweg, 1964

Tabuľka 1. Klasifikácia poznania a nepoznania

Nepoznanie	Otázka	Poznanie
Neistota	Inkvizitórna otázka	Vlastné poznanie
Zmätok	Exkvizitórna otázka	Nevlastné poznanie
Ignorancia	Nezmyselná otázka	Nadbytočné poznanie

Legenda k Obrázku 1.

Obrázok 1. Portrét Anny Achmatovej od Amedea Modiglianiho. Komplexita a uložené poznanie sú nie „uložené“ v pár ťahoch kresby.



Anna Achmatova

Amedeo Modigliani, 1911