



Proč by se měl filozof vědy zajímat o simulace?

Eva Žáčková, Mezioborové aktivity, Nové technologie - výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt: Proč by se měl filozof vědy zajímat o počítačové simulace? Autorka ve své práci argumentuje tezi, podle níž je počítačová simulace nejen samozřejmou součástí vědeckých metod, ale navíc má potenciál rozvíjet na poli filozofie vědy zcela nové metodologické koncepty a kategorie. Na příkladu tzv. numerického experimentu, který představuje jednu z nejčastějších podob počítačových simulací ve vědě, je ukázán jejich nejasný metodologický status. Na jedné straně lze u simulací (konkrétně numerického experimentování) sledovat vlastnosti, které jsou typické pro teoretický přístup ve vědě, na druhé straně však rovněž vystupují v roli velmi blízké empirické evidenci, čímž se naopak blíží experimentu. V textu autorka představuje zejména Humphreysovu interpretaci počítačové simulace jako hybridní kategorie, která vzbuzuje diskuzi nad založením zcela nové, simulace lépe postihující teorie vědy.

Abstract: Why should a philosopher of science be interested in simulations at all? The author of the paper points out current ubiquity of computer simulation methods in science, and more importantly, their great potential for development of truly new methodological concepts and categories in theory and philosophy of science. The described example of a numerical experiment, which is one of the most used and useful forms of simulation in science, epitomizes their ambiguous methodological status. On one hand, one can clearly identify features of simulations that are obviously related to theoretical approaches in science. On the other hand, simulations often play a role similar to empirical evidence, which leads us to a conclusion that simulations might be more on the experimental side. In this paper I focus mainly on Humphreys' interpretation of simulation as a hybrid category that could arouse a call for new foundation of theory of science.

Klíčová slova: metodologie vědy, komputační empirismus, počítačová simulace, numerický experiment

Keywords: methodology of science, computational empiricism, computer simulation, numerical experiment

Proč simulace?

Většina autorů se obrací ke zkoumání role počítačových simulací ve vědě ze zjevného důvodu. Jsou totiž až příliš významným nástrojem dnešní vědy, než aby je bylo možné přehlížet. V centru pozornosti filozofie vědy jsou od počátku svého masivního uvedení (tj. zejména od 80. let 20. století) do pedagogické praxe vysokých škol a výzkumné praxe odborných týmů. Zcela nepostradatelnou součástí výzkumu jsou počítačové simulace v oboru meteorologie, atomové fyziky, astrofyziky, evoluční biologie, teorie rozhodování či teorie chaosu a komplexity, v inženýrských oborech, stavitelství a architektuře (srov. např. Hartmann 2005, Frigg – Reiss 2009, Turkle 2009). Počítačové simulace vystupují v procesech našeho poznávání světa v mnoha rolích, jež lze podle Hartmanna (2005, 6 a n.) kategorizovat do pěti vzájemně se prolínajících základních skupin: (1) simulace jako technika výzkumu dynamiky systému, (2) jako heuristický nástroj objevování hypotéz, modelů a teorií, (3) jako pedagogický nástroj pro rozvíjení porozumění určitých procesů, (4) jako podpůrný nástroj experimentátorů a nakonec (5) simulace jako substitute tradičního experimentu. Turkle (2009) odkrývá další význam počítačových simulací z hlediska sociologie vědy. Ve svých etnografických studiích popisuje vztah vědců k simulačním metodám a technologiím od rané fáze jejich zavádění, čímž se jí daří rozkrývat nevyřčené, nicméně v samotné vědě uplatňované principy, předsudky a ve své podstatě kulturní normy stojící v jádru tehdejších vědeckých komunit daných disciplín. Rovněž poukazuje na změny v profesní identitě odborníků vyvolané tlakem na používání počítačových simulačních a vizualizačních programů. V neposlední řadě dochází ke kulturologické a sémiotické interpretaci fenoménu počítačové simulace vyskytující se ve vědě i v laickém prostředí (viz např. Baudrillard 1981, Eco 1998).

Někteří autoři (Rohrlich 1991, Galison 1996, Sismondo 1999, Schweber a Wächter 2000, Winsberg 2001, Humphreys 2004), jak uvádí Frigg a Reiss (2009) a Humphreys (2004, 2009), jdou ještě dále a argumentují, že počítačové simulace vnášejí do vědy tak zásadně nové problémy a kategorie, že je třeba s ohledem na tento fakt vytvořit novou filozofii a teorii vědy. Frigg a Reiss (2009) naopak tvrdí, že simulace nejsou filozoficky nijak zajímavé, protože veškeré zdánlivě nové obtíže s nimi spojené, které tyto autoři spatřují prakticky ve všech filozofických rovinách simulace (od metafyzické přes epistemickou a sémantickou až po metodologickou), lze v zásadě redukovat na již známé problémy filozofie a teorie vědy (např. problematiku modelování a reprezentace obecně, vztah teorie a daného systému, problém aplikace laboratorních výsledků v reálném světě, problém verifikace, predikce atd.), a že tudíž nic nového z pohledu filozofie vědy nepřináší, už vůbec ne nutnost budování nové teorie vědy.

V tomto příspěvku budu zastávat „optimistické“ stanovisko.¹ Tedy budu se snažit obhájit alespoň jeden argument ve prospěch teze, že současná filozofie vědy nenabízí dostatečně uspokojivý teoretický rámec, jímž by bylo možné uchopit povahu a roli

¹ „Optimistické“ v tom smyslu, že téma simulací přece jen může být úrodnou půdou pro nové filozofické koncepty v teorii vědy.

počítačových simulací ve vědě v jejich úplnosti. Tento argument se opírá o tvrzení, že „... počítačová simulace zakládá kvalitativně novou a odlišnou metodologii ... jež se nachází někde mezi tradiční teoretickou fyzikální vědou a jejími empirickými metodami experimentování a pozorování“ (Rohrlich, 1991, s. 507). Vidíme tedy, že v našem případě se ze všech výše uvedených možných aspektů simulací zaměříme na jejich metodologické zakotvení. Konkrétně půjde o metodu numerického experimentu, tj. o počítačové simulace v roli substitute experimentu tradičního. Počítačovou simulací zde chápeme rozsáhlý výpočetní proces, jehož cílem je nalezení dynamické stavové trajektorie zkoumaného abstraktního systému, který modeluje reálný systém při zadaných experimentálních podmínkách.

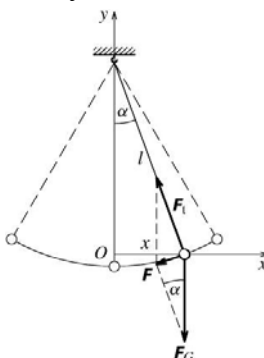
Argument ve prospěch Rohrlichovy teze má současně posloužit cíli našeho článku, tedy podat plausibilní odpověď na naši původní otázku, proč by se měl filozof vědy zajímat o simulace.

Metodologie vědy v praxi

Pojďme se nyní podívat na jednu konkrétní (z explanačních důvodů poměrně triviální) fyzikální úlohu a metody, které nám k jejímu řešení věda standardně nabízí. Řekněme, že chceme znát polohu jednoduchého kyvadla v určitém čase. V zásadě máme k dispozici dva možné postupy řešení takové úlohy – teoretické a experimentální.

Metoda 1 (teoretické řešení): Využijeme fyzikální teorii mechanického kmitání a sestavíme diferenciální rovnici,² kterou manipulací se symboly pomocí známých syntaktických transformačních pravidel – tzn. analyticky – převedeme do tvaru, kdy lze rovnici vyřešit dosazením známých fyzikálních veličin a zejména pak požadovaného časového okamžiku.

Metoda 2 (experiment): Rozkmitáme kyvadlo a v daném čase změříme jeho polohu.



Obr. 1: Nákres kmitavého pohybu jednoduchého kyvadla.

Obě varianty řešení jsou běžnou součástí vědeckých metod. V praxi obvykle experimentální řešení slouží k potvrzení či vyvrácení teorie. Pokud je teorie považována za dostatečně koroborovanou (empiricky), můžeme ji používat k predikování. Tzn., empirický experiment nadále nemusíme provádět. Polohu kyvadla o daných parametrech lze od této chvíle určit (predikovat) pro jakýkoli časový okamžik pouze dosazením proměnné času.

² Matematický zápis diferenciálních rovnic zde neuvádím, neboť není pro další výklad relevantní a zároveň je snadno dohledatelný v základních vysokoškolských učebnicích.

Řekněme nyní, že budeme chtít vyřešit na první pohled podobnou, i když složitější úlohu. Tentokrát budeme chtít predikovat polohu dvojitého kyvadla v určitém čase. (Experimentální řešení nás v tuto chvíli nezajímá. I když je proveditelné, není pro predikci užitečné.)

Metoda 1 (teoretické řešení): Stejně jako v prvním příkladu sestavíme na základě fyzikální teorie mechanického kmitání diferenciální rovnici (soustavu rovnic).

Tvar této složité soustavy rovnic však nelze postupně upravovat do podoby, ve které by na jedné straně stála neznámá (v našem případě výchylka kyvadla určující jeho polohu) a na druhé straně známé vztahy, konstanty a proměnná času. Analytické řešení této úlohy zkrátka neexistuje,³ neboť se nám nepodaří z rovnic odstranit diferenciál času (dt), který vyjadřuje nekonečně malý přírůstek času, zatímco nás zajímá konkrétní časový okamžik (t). Vedle analytického (tj. teoretického) řešení lze však použít řešení numerické.

Metoda 2 (numerické řešení): Soustavu diferenciálních rovnic se pokusíme tedy řešit numericky. Takové řešení však ve své podstatě neodhaluje vztah mezi diferenciální rovnicí a jejím řešením. Postup numerického řešení naší úlohy začíná v čase t_0 , kdy je počáteční podmínka, tj. poloha kyvadla, známá. Z této počáteční podmínky pak vypočítáváme nekonečně malou změnu v dráze kyvadla za „nekonečně“ malý časový okamžik⁴ (v tom ostatně spočívá podstata diferenciálních rovnic). Odtud pak rekurzivně postupujeme s výpočtem dráhy kyvadla pro další „nekonečně“ malý časový okamžik, dokud se nedostaneme k časovému okamžiku, pro který nás poloha kyvadla zajímá.⁵ Tzn., pro jakýkoli časový okamžik musíme vždy provést výpočet polohy kyvadla pro všechny předchozí (aproximativně nekonečně malé) časové okamžiky.

Numerické řešení naší úlohy, která je ze své podstaty velmi citlivá na jakoukoli nepřesnost,⁶ je zjevně mimo lidské dimenze. V praxi se ukazuje, že takové řešení je nerealizovatelné jednak kvůli časové a výpočetní náročnosti, a jednak je ze své podstaty nespolehlivé kvůli své pouze hrubě aproximativní povaze. Aby totiž mohl člověk aspirovat alespoň na první krok numerického řešení naší úlohy (tj. vypočítat polohu kyvadla po prvním „nekonečně“ malém časovém okamžiku od počátku jeho pohybu), volí si obvykle časové kroky, které vlastně vůbec nejsou dostatečně blízké „nekonečně malým“. Navíc právě proto, že v úlohách tohoto typu pracujeme s aproximacemi nekonečných veličin, které jsou *volitelně* přesné, lze toto řešení zpřesňovat neustále. V tomto smyslu je tedy numerický výpočet na rozdíl od analytického řešení závislý na čase. Díky výpočetnímu výkonu dnešních počítačů se v podobných případech rovnou přistupuje k jinému řešení – k numerickému experimentu.

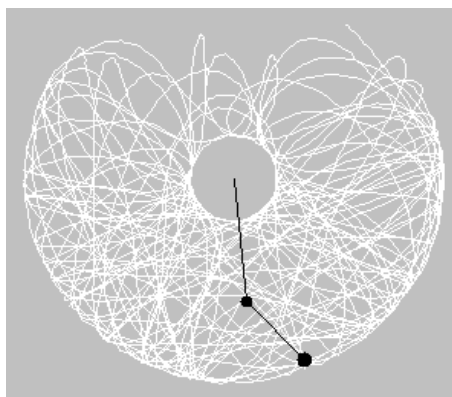
³ Dvojitě kyvadlo je učebnicový příklad úlohy, pro kterou neexistuje analytické řešení.

⁴ Za takový „nekonečně“ malý časový okamžik považujeme co nejmenší úsek, který bude co nejlépe aproximovat časovou změnu limitně se blížící nule.

⁵ K numerickému řešení diferenciálních rovnic byla vypracována celá řada metod (např. Eulerova či Runge-Kuttova), které aproximují ideální spojité řešení v diskrétním prostoru. Jejich diskuze zde však z pohledu filozofie vědy není důležitá. Je pochopitelné, že se v konkrétních případech vyloučí metody nevhodné (např. numericky nestabilní).

⁶ Dvojitě kyvadlo je klasickým příkladem velmi nelineárního systému vykazujícího silně deterministicky chaotické chování (viz obr. 2), kde malá změna v počátečních podmínkách vede k diametrálně odlišné trajektorii kyvadla.

Metoda 3 (numerický experiment): Numerický experiment spočívá v numerickém řešení soustavy diferenciálních rovnic počítačem. Fakticky tedy dojde k počítačové simulaci (z lat. *simulationem* – tj. napodobení, imitace) kmitání dvojitého kyvadla (které lze mimochodem velmi efektně vizualizovat, viz obr. 2). Jelikož jsme ukázali, že metoda 2 je zde nepoužitelná, je numerický experiment jediný realizovatelný, a tedy i nejpřesnější způsob řešení této úlohy. Na rozdíl od člověka předvádí počítač v tomto případě impozantní výkon. Provádí desítky až stovky tisíc výpočetních operací v relativně krátkém reálném čase, čímž se mu mnohem lépe (nesouměřitelně vůči člověku) daří aproximovat ony „nekonečně“ malé časové kroky.



Obr. 2: Vizualizace dráhy pohybu dvojitého kyvadla.

Tato úloha, která přehledně ilustruje fundamentální aspekty celé třídy praktických simulačních úloh využívaných ve vědě a inženýrství, nám měla v první řadě demonstrovat kvalitativní rozdíl mezi analytickým a numerickým řešením. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma spočívá v přesnosti – analytické řešení je absolutně přesné,⁷ numerické řešení je aproximativní, a v časovosti – analytické řešení je atemporální (výsledek je implicitně přítomen ve tvaru rovnice), numerické řešení je závislé na reálném čase (s každým krokem výpočtu lze výsledek zpřesňovat,⁸ nelze ho však „vyanalyzovat“ z tvaru rovnice).

Na závěr této argumentace jsme ukázali, že díky výpočetnímu výkonu počítačů lze překonat omezení daná dimenzí lidského světa a že lze provést numerickou metodou počítačovou simulaci pohybu dvojitého kyvadla, a tím určit jeho polohu.

Simulace mezi teorií a experimentem

V rámci filozofie vědy se nad tímto stavem vede spor o to, do jaké metodologické kategorie numerické experimentování vlastně spadá. Frigg a Reiss (2009) tvrdí, že jde v zásadě o „pouhé“ řešení rovnice, tedy že jde o teoretické řešení problému. U teorie však obvykle očekáváme jistá „instantní“ řešení, která jsou v zásadě všechna v teorii obsažena. K tomu

⁷ Pochopitelně hovoříme o přesnosti vzhledem k řešené rovnici, nikoli k reálnému systému. Jakékoli matematické řešení je vždy idealizací reálného systému.

⁸ V každém výpočetním kroku, kterého je dosaženo v nějakém okamžiku reálného času (tj. času řešení, nikoli časové dimenze simulované úlohy), se tak fakticky dostáváme k novému numerickému výsledku. U vhodně zvolených numerických metod pak posloupnost takto získávaných výsledků konverguje k přesnému řešení, kterého však lze potenciálně dosáhnout pouze v nekonečném reálném čase.

teorie koneckonců vytváříme. Když potom chceme vědět, jak dlouho nám bude trvat cesta z Plzně do Prahy, nemusíme čekat, až do Prahy dojedeme a podíváme se na hodinky. Můžeme daný čas strávený na cestě prostě predikovat díky známým vztahům mezi rychlostí, vzdáleností a časem, které vyplývají z obecných fyzikálních principů. Stačí dosadit do rovnice ($t=s/v$) libovolnou vzdálenost a rychlost a rovnou dostaneme výsledek.

V případě numerického řešení rovnice to však takto jednoduché není, protože vztahy mezi jednotlivými veličinami prostě neznáme (známe jen vztahy, ve kterých figurují diferenciály těchto veličin). Nemůžeme se rovnou ptát, v jaké poloze bude dvojitě kyvadlo po 15 sekundách kmitání. Musíme zrekonstruovat pohyb kyvadla po dostatečně malých časových okamžicích od počátku kmitání (tj. t_0) až do okamžiku, který nás zajímá. Ovšem viděli jsme, že jde o úkol doslova „nadlidský“.

V úloze s dvojitým kyvadlem se tak k výsledku (určení jeho polohy v daném čase) dostáváme jen a pouze „spuštěním“ (realizací) simulace na počítači, který disponuje výpočetní kapacitou umožňující dnes již poměrně přesvědčivé blížení se „nekonečně malé“ dimenzi časového kroku. Ve světě se tak (na rozdíl od analytického řešení) přeci jen musí něco fyzicky odehrát (kmitání procesoru počítače, přenos informací v křemíku),⁹ abychom dosáhli řešení. Nejde zkrátka o čistý analytický kalkul, ve kterém je tvar rovnice jednoznačnou reprezentací výsledku, jenž je zcela nezávislý na lidském světě stínů (slovy Platona). Setkáváme se tu s něčím „hmatatelnějším“, s něčím, co se naopak z principu odehrává a proměňuje v závislosti na aktuálních podmínkách materiálního světa.

Celý proces numerického experimentu je složen z tak velkého množství operací, že se člověku „propadá za obzor“. Stává se z něj tzv. černá skříňka. Pokud by například počítač udělal nějakou drobnou numerickou chybu v průběhu výpočtu, je pro nás prakticky nemožné odhalit, v kterém konkrétním kroku k chybě došlo (v horším případě nemusíme ani zjistit, že k nějaké chybě dochází). To je v přímém kontrastu s analytickým řešením, jehož algoritmus je ze své podstaty plně sledovatelný. Z těchto důvodů je neudržitelné stanovisko, které tvrdí, že počítačové simulace představují v zásadě teoretické řešení.

Jde tedy o metodu ve své podstatě experimentální? Nakonec říkáme tomu přece numerický *experiment*. Většina autorů se argumentací ve prospěch této teze (či proti ní) nezaobírá. Zdá se, že mezi filozofy vědy není sporu o tom, že tradičnímu pojetí experimentu jako empirické evidence potvrzující teorii počítačová simulace neodpovídá. Žádné kyvadlo nikde nekmitá a samotný „experiment“ či „měření“ se nikde nestýká s reálným fyzickým světem. Z těchto důvodů není udržitelné ani stanovisko, že počítačová simulace je experimentem v běžném pojetí teorie vědy. Na druhou stranu nelze přehlédnout, že simulace (i v našem případě s kyvadlem) běžně ve vědě vystupuje v roli srovnatelné s empirickou evidencí, což jistě není zanedbatelné.

⁹ Kmitání procesoru počítače či přenos informací v křemíku, které zde máme na mysli, ovšem nelze v žádném smyslu ztotožňovat či převádět na kmity kyvadla!

Hybridní postavení simulace si zaslouží pozornost filozofie vědy

Podobné rozpaky nad zakotvením metodologického statusu simulací ve vědě vedou mnohé filozofy vědy (Rohrlich 1991, Hartmann 2005, Humphreys 2004 a 2009) k přesvědčení, že se setkáváme s novou specifickou kategorií, která je svou povahou hybridní a která nejen že si z této pozice podle nich zaslouhuje pozornost filozofie vědy (potud s nimi souhlasím i já), ale že jsou dokonce důvodem pro budování nové „moderní“ teorie vědy (Humphreys 2009).

Humphreys (1995, s. 119-120) tímto směrem uvažoval již v polovině 90. let 20. století, kdy propagoval označení *komputační empirismus* pro metodologický přístup, kterým vědci fakticky společně s počítačovou simulací přijali do vědy na přelomu 20. a 21. století matematickou rekonstrukci teorie. Humphreys tak zároveň poukázal na neudržitelnost logické rekonstrukce teorie, jak se o ni snažil logický empirismus, jehož metody převládaly ve filozofii vědy po většinu 20. století.

Kromě toho, co bylo naznačeno v úvodu a v průběhu mé argumentace, existují ještě další důvody, pro které jsou simulace zajímavé z hlediska filozofie vědy. Humphreys (2009) např. upozorňuje na problém narušení antropocentrické epistemické autority, na kterou jsme byli v minulosti zvyklí. Odtud se dá jistě dál uvažovat o souvislosti se simulacemi založenými na technologiích umělé inteligence a jejich možné epistemické nadřazenosti vůči lidskému poznání. Například Hartmann (2005) a Lenhard (2010) uvažují o simulacích jako o významném interdisciplinárním nástroji, který vytváří metodologický most mezi přírodními a společenskovedními disciplínami. Fascinující je rovněž síla simulací v inženýrství a aplikovaném výzkumu, kde jsou numerické experimenty dostatečnou a často jedinou evidencí, která rozhoduje o uvolnění produktu na trh a jeho používání v našem každodenním životě (např. testování bezpečnosti automobilů). V neposlední řadě samotná historie vědy ukazuje, jak simulace jakožto původně nástroj predikce jevu postupně vedla v meteorologii ke snaze porozumět danému jevu a v poslední fázi přesměřovala zájem odborníků na porozumění podstatě predikce samotné (Williams – Thomas 2009).

Jako jednu z největších výzev však chápu otázku, zda nezměrný rozdíl v kvantitativní rovině operací mezi člověkem a počítačem používajícím numerickou metodu neindikuje na straně počítače přechod v novou kvalitu výsledného řešení, o kterém by se dalo uvažovat jako o blížícím se svou kvalitou řešení analytickému. Tato otázka nesouvisí pouze s metodologickým zakotvením počítačové simulace, ale rovněž s jevem emergence, který je v souvislosti s nimi v odborné komunitě také sledován.

Role počítačových simulací ve vědě rozhodně neslábne. Jejich potenciál se naopak rozvíjí a spolu s nimi, domnívám se, i spektrum filozofických problémů vědy, které lze v budoucnu očekávat. To všechno jsou důvody, pro které by filozofové vědy neměli ignorovat počítačové simulace.

Literatura

Baudrillard, J. (1981) *Simulacres et simulation*. Paris: Galilée.

Eco, U. (1998) *Faith in Fakes. Travels in Hyperreality*. London: Vintage.

Frigg, R. – Reiss, J. (2009) The Philosophy of Simulation. Hot New Issues or The Same Old Stew? *Synthese*, 169 (3), s. 593-613.

Hartmann, S. (2005) The World as a Process. Simulations in the Natural and Social Sciences. *PhilSci-Archive* [online].[cit. 2013-03-13] Dostupné z WWW: <<http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/2412>>

Humphreys, P. (1995) Computational Empiricism. *Foundation of Science*, 1 (1), s. 119-130.

Humphreys, P. (2004) *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. Oxford: OUP.

Humphreys, P. (2009) Philosophical Novelty of Computer Simulation Methods. *Synthese*, 169 (3), s. 615-626.

Lenhard, J. (2010) Computation and Simulation. In: Frodeman, R. et al. (eds.): *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity*. Oxford University Press, 246-258.

Rohrlich, F. (1991) Computer Simulation in the Physical Sciences. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Volume 2, s. 507-518.

Turkle, S. (2009) *Simulation and Its Discontents*. Cambridge: The MIT Press.

Williams, L. – Thomas, W. (2009) The Epistemologies of Non-Forecasting Simulations. *Science in Context*, 22(2), s. 271-310.