

///// studie / article //////////////////////////////////////

**SIMULACE  
A INSTRUMENTÁLNÍ POJETÍ  
VĚDY**

**Abstrakt:** *Stať se zabývá diskusemi o epistemologicko-metodologické roli simulací v soudobé vědě. Soustředí se nejprve na aktuálnost těchto diskusí v současné metodologii vědy a následně na její návaznost na určitou myšlenkovou tradici z osmdesátých let 20. století, kdy diskuse kolem modelování vyvolaly řadu otázek zpochybňujících tradiční pojmové distinkce, především mezi experimentem a teorií. Stať se přiklání v rámci těchto diskusí k názorům, které řadí simulace k novým a specifickým nástrojům vědy, jež také vyžadují novou a specifickou metodologii a epistemologické postavení. Pro podporu této názorové pozice jsou uvedeny některé aktuální analýzy konkrétních příkladů simulací a jejich specifického postavení v moderní vědě.*

**Klíčová slova:** *simulace; modely; teorie; experiment; instrumentalismus*

**VLADIMÍR HAVLÍK**  
Filosofický ústav AV ČR, v. v. i.  
Jilská 1, 110 00 Praha 1  
email / [havlik@flu.cas.cz](mailto:havlik@flu.cas.cz)

**Simulation and Instrumental  
Conception of Science**

**Abstract:** *The article deals with the discussions about the epistemological and methodological role of simulation in contemporary science. It focuses firstly on the current status of these discussions in the methodology of science, and then to its continuity with a certain thinking traditions of the 1980s, when discussions about modeling raised numerous questions challenging the traditional conceptual distinctions, especially between experiment and theory. The article adheres to the view that simulation is a new and specific tool of science that will also require new and specific methodology and epistemological assessment. To support this point of view, some recent analyses of specific examples of simulations, and their specific status in modern science, are discussed in detail.*

**Keywords:** *simulations; models; theories; experiments; instrumentalism*

## Simulace jako specifikum soudobé vědy

Tvrzení, že specifickým aspektem soudobé vědy je masivní využívání počítačové digitální technologie, by nebylo nijak zvlášť filosoficky zajímavé, kdyby znamenalo jen aplikaci instrumentů umožňujících digitalizaci takovým způsobem, jako je tomu ve většině ostatních oblastí lidské činnosti. Obecné otázky digitalizace si sice vyžadují jistou filosofickou reflexi, ale epistemologicky je výše uvedené tvrzení zajímavé v té chvíli, kdy se pouhá instrumentální aplikace činnosti mění ve svébytný nástroj pro získávání vědění a proměňuje či problematizuje se tak její epistemologický status. Nemám v této souvislosti tedy na mysli pouhou skutečnost, že se nástroje výpočetních technologií prosazují jako prostředky ve všech sférách přírodních i společenských věd, ať již pro sběr, uchování a analýzu dat, včetně problematiky jejich zpracování, vyhledávání v nich, jejich dostupnosti a vizualizace. Simulace, přestože mnohé z těchto aktivit předpokládají, jsou mnohem specifičtější v tom, že vyžadují existenci modelu určité části reality, který je realizovatelný v prostředí počítače. Zjednodušeně řečeno se většínou jedná o určitý systém matematických rovnic popisujících časovou vývoj jednotlivých parametrů takového modelu, i když nelze obecně simulace omezovat jen na tyto případy. Simulace představují tedy mnohem specifičtější problém než jen pouhé otázky digitalizace. A právě v této podobě se zhruba od devadesátých let minulého století objevují vyhraněnější filosofické diskuse tematizující otázku počítačových simulací. V této stati se proto chci zaměřit na současný stav těchto diskusí o epistemologickém statusu *simulací* a na několika konkrétních příkladech podpořit specifčnost simulací jako *nového nástroje vědění s dříve netušenými možnostmi v soudobé vědě*.<sup>1</sup>

S určitou nadsázkou lze tvrdit, že v době před nástupem počítačové digitální technologie byla věda v zásadě provozována buď pozorováním, nebo teoretizováním. Při detailnějším pohledu bychom samozřejmě hledali ostrou dělicí čáru mezi pozorováním a teoretizováním jen těžko, vzhledem k tradičním otázkám zatíženosti pozorování teorií či problému empirické báze, avšak nejde nám nyní o problematizování této distinkce, ale spíše o specifický nové vyjádření jejich empiricko-teoretického provázání v rámci

Tato studie vznikla za podpory projektu OP VK Výzkumné centrum pro teorii a dějiny vědy, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/20.0138 spolufinancovaného z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

<sup>1</sup> Paul HUMPHREYS, *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism and Scientific Method*. New York: Oxford University Press 2004.

počítačových simulací. Nejprve se však pokusme stručně ukázat status a genezi filosofických diskusí odvíjejících se zhruba od počátku devadesátých let.

V počátcích je filosofickou ambicí především ukázat podstatu počítačových simulací v obecném kontextu, vysvětlit proč se stávají esenciální součástí současné vědecké metodologie a zároveň zdůvodnit proč jejich užití vyžaduje nové pojetí vztahu mezi teoretickými modely a jejich aplikacemi.<sup>2</sup> Pokud bychom chtěli v následných diskusích nalézt nějaký invariant, pak bychom ho mohli charakterizovat jako spor o epistemologický status simulací, který v těchto diskusích nabývá různých podob a míry obecnosti. Např. ve zmiňovaném článku z roku 1990 se Paul Humphreys odvolává na vývoj matematického vědění a srovnává možnost simulací koncem dvacátého století s obdobnými objevy diferenciálního a integrálního kalkulu v 17. století, nebo statistickými metodami na konci 19. století. V tomto případě vidí problém epistemologického statusu v tom, zda jde o skutečně novou metodu ve vědě, jak tvrdí někteří autoři, nebo se jedná pouze o technologicky vylepšené rozšíření metod, které zde existovaly již po dlouhou dobu.<sup>3</sup>

Obdobně charakterizuje Eric Winsberg v roce 2003 na základě dosavadní literatury tři možné metodologické pohledy na simulace vzhledem k experimentální praxi: 1.) simulace nejsou nic více ani nic méně než užití brutální síly výpočetních prostředků k řešení analyticky neřešitelných rovnic;<sup>4</sup> 2.) „simulace“ a „numerické experimenty“ jsou brány jako reální zástupci nebo nápodobu systémů skutečného světa a lze s nimi experimentovat jako s libovolnými jinými experimentálními objekty; 3.) simulace jsou „třetím modelem“ vědy, ani experimentálním ani teoretickým.<sup>5</sup>

S explicitními intencemi hledat epistemologickou privilegovanost na ose experiment-simulace vystupují později mnozí další autoři.<sup>6</sup> Např.

<sup>2</sup> Paul HUMPHREYS, „Computer Simulations.“ Im *PSA Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, sv. 2 „Symposia and Invited Papers 1990.“ Chicago: University of Chicago Press 1990, s. 497 (497–506).

<sup>3</sup> *Ibid.*, s. 498.

<sup>4</sup> Viz např. Roman FRIGG – Julian REISS, „The Philosophy of Simulation: Hot New Issues or Same Old Stew?“ *Synthese*, roč. 169, 2009, č. 3, s. 593–613.

<sup>5</sup> Eric WINSBERG, „Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World.“ *Philosophy of Science*, roč. 70, 2003, č. 1, s. 109 (105–125).

<sup>6</sup> Francesco GUALA, „Models, Simulations, and Experiments.“ In: MAGNANI, L. – NERSESSIAN, N. J. (eds.), *Model-Based Reasoning: Science, Technology, Values*. New York: Kluwer 2002, s. 59–74; Steven L. PECK, „Simulation as Experiment: A Philosophical Reassessment for Biological Modeling.“ *Trends in Ecology and Evolution*, roč. 19, 2004, č. 10, s. 530–534; Mary S. MORGAN, „Experiments versus Models: New Phenomena, Inference

Emily C. Parke se snaží ukázat, že přestože je metodologická distinkce mezi experimentem a simulací jistě důležitá pro tvrzení o jejich epistemické hodnotě, není možné se odvolávat na nějaký generalizovaný vztah mezi experimentem a simulací napříč vědou, protože tento vztah je kontextuálně závislý. Poukazuje zde k rozdílným možnostem chápání „simulace“, např. v užším smyslu jako počítačové simulace, kdy jsou studovány dynamické počítačové modely v závislosti na čase, nebo simulace v mnohem obecnějším smyslu, kdy jsou předmětem studia různé druhy modelů: matematické, počítačové, hmotné (fyzikální), a simulace v tomto obecném smyslu pak zahrnují jak počítačové modely, tak modely organismů v laboratořích či modely letadel v aerodynamických tunelech.<sup>7</sup> I v této souvislosti je tedy nutné hledat odpověď na otázku, zda jsou simulace skutečně něčím novým vzhledem k idealizacím a modelováním, které mají ve vědě dlouhodobou tradici. V tomto smyslu bychom pak modelování, jako umělé nahrazení jevu, mohli pokládat za počátek simulací. Je tak třeba zvážit otázku, zda není simulace jen sofistikovanějším případem modelování, při němž pouze využíváme výpočetní možnosti digitálních technologií, aniž by to bylo nějak epistemologicky pozoruhodné.

Zdá se tedy, že zde máme jakousi pomyslnou síť vazeb mezi tradičními instrumenty vědy: matematizací, modelováním a experimentem do níž je třeba umístit simulace jako nový prostředek pro získávání vědění. Zda splynou simulace z epistemologického hlediska s matematizací, modelováním i experimentální činností, nebo naopak zaujmou vzhledem k některým nebo

and Surprise.“ *Journal of Economic Methodology*, roč. 12, 2005, č. 2, s. 317–329; Anouk BARBEROUSSE – Sara FRANCESCHELLI – Cyrille IMBERT, „Computer Simulations as Experiments.“ *Synthese*, roč. 169, 2008, č. 3, 2008, s. 557–574; Margaret MORRISON, „Models, Measurement and Computer Simulation: The Changing Face of Experimentation.“ *Philosophical Studies*, roč. 143, 2009, č. 1, s. 33–57; Margaret MORRISON, *Reconstructing Reality: Models, Mathematics, and Simulations*. New York: Oxford University Press 2015; Wendy S. PARKER, „Does Matter Really Matter? Computer Simulations, Experiments, and Materiality.“ *Synthese*, roč. 169, 2009, č. 3, s. 483–496; Eric WINSBERG, „A Tale of Two Methods.“ *Synthese*, roč. 169, 2009, č. 3, s. 575–592; Isabelle PESCHARD, „Is Simulation an Epistemic Substitute for Experimentation?“ In: VAIENTI, S. (ed.), *Simulations and Networks*. Paris: Hermann (v tisku). Dostupné z: <[http://ipeschard.free.fr/Is\\_simulation\\_an\\_epistemic%20substitute.pdf](http://ipeschard.free.fr/Is_simulation_an_epistemic%20substitute.pdf)> [cit. 1. 9. 2016]; Emily C. PARKE, „Experiments, Simulations, and Epistemic Privilege.“ *Philosophy of Science*, roč. 81, 2014, č. 4, s. 516–536.

<sup>7</sup> Emily C. PARKE, „Experiments, Simulations, and Epistemic Privilege,“ s. 517. S uvedenou typologií užšího a obecnějšího pojetí simulace se v tomto případě nemusíme plně ztotožňovat, protože uvedený příklad slouží jen k načrtnutí aktuálnosti epistemologického statusu simulací jako nového nástroje vědy.

dokonce ke všem těmto tradičním instrumentům výsadnější postavení, je předmětem těchto filosoficko-metodologických diskusí.

Veškeré instrumenty vědy, které nějak problematizují tradiční metodologii, si vždy vyžadují filosofickou reflexi ve filosofii vědy a tak podobně jako nyní simulace, zde existují i jiné instrumenty vědeckého bádání, které nějak problematizují antropologickou epistemologii. Dobrým příkladem takových instrumentů mohou být radioteleskopy, škálovací tunelové mikroskopy<sup>8</sup> a urychlovače, protože jejich výstupy musí být zpracovány prostřednictvím jiných instrumentů a ne přímo lidskými smysly.

Snaha o nalezení svébytného místa pro simulace v rámci tradiční vědecké metodologie se tak objevuje od počátku 90. let. Paul Humphreys i Fritz Rohrlich<sup>9</sup> chápou simulace jako kvalitativně nový instrument vědeckého bádání: „Počítačové simulace poskytují (i když ne výlučně) kvalitativně novou a odlišnou metodologii pro fyzikální vědy a tato metodologie leží někde mezi tradičními teoretickými fyzikálními vědami a jejich empirickými metodami experimentováním a pozorováním.“<sup>10</sup>

Pravděpodobně to byl Peter Galison, kdo svou metaforou *metodologické mapy* inspiroval k obdobným úvahám další autory při snaze umístit simulace do tohoto pomyslného prostoru. Galison<sup>11</sup> zde zdůrazňuje nejen svébytnost simulací, ale také obtíže při jejich epistemologicko-metodologické lokalizaci: „[Simulace] uvádějí fyziku do prostoru paradoxně dislokovaného od tradiční reality tím, že těžší z experimentální i teoretické domény, propojují je dohromady, a používají výslednou koláž k vytvoření marginalizovaného podsvětí, které je najednou nikde a všude na obvyklé metodologické mapě.“<sup>12</sup> Podobně se později ptá i Winsberg s odkazem na Galisona: „Takže kde ‚na metodologické mapě‘ leží techniky počítačových simulací? Jaké vlastnosti simulace skutečně sdílejí s laboratorními experimenty?“<sup>13</sup>

<sup>8</sup> Viz Paul HUMPHREYS, „The Philosophical Novelty of Computer Simulation Methods.“ *Synthese*, roč. 169, 2009, č. 3, s. 617 (615–626).

<sup>9</sup> Fritz ROHRlich, „Computer Simulation in the Physical Sciences.“ *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, sv. 2 „Symposia and Invited Papers, 1990“, Chicago: University of Chicago Press 1990, s. 507–518.

<sup>10</sup> *Ibid.*, s. 507.

<sup>11</sup> Peter GALISON, „Computer Simulations and the Trading Zone.“ In: GALISON, P. – STUMP, D. (eds.), *The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power*. Stanford: Stanford University Press 1996.

<sup>12</sup> *Ibid.*, s. 120.

<sup>13</sup> WINSBERG, „Simulated Experiments,“ s. 105–106.

A konečně v současné době také Margaret Morrisonová charakterizuje toto úsilí ve své knize *Reconstructing Reality*,<sup>14</sup> kde sice nepovažuje tuto otázku za centrální invariant těchto diskusí, ale podřazuje ji pod snahu o zhodnocení dat produkovaných při simulacích, což vede „k sérii podotázek, kam přesně bychom měli umístit počítačové simulace v metodologické krajině.“<sup>15</sup> Za obvyklou a atraktivní charakteristiku počítačových simulací přitom považuje „hybridní“ názor, že počítačové simulace obsahují aspekty modelování i experimentování a díky tomu se nacházejí ve střední pozici. „Důsledkem toho je, že data produkovaná při simulaci mají epistemický status méně robustní než data poskytovaná experimenty, ale více než výsledky získané z matematické manipulace a kalkulace s modely.“<sup>16</sup>

Morrisonová ale nepovažuje tuto obecnou charakteristiku počítačových simulací, jako hybridní aktivity, za příliš metodologicky a epistemologicky přínosnou. Domnívá se, že důvodem pro takové stanovisko je skutečnost, že existuje mnoho typů počítačových simulací, které vychází z odlišných metodologií a jsou užity v různých experimentálních kontextech, takže hybridní pohled není řešením.<sup>17</sup> Na rozdíl od toho se Morrisonová snaží obhájit

mnohem skromnější návrh, že v některých případech a se specifickým typem simulačních technik je odůvodněné tvrzení, že simulační výstupy mohou fungovat jako experimenty. V určitém smyslu tedy nezáleží na tom, zda můžeme charakterizovat simulaci jako experiment, ale záleží na tom, zda její výstupy dosahují stejného epistemologického statusu, když je dosaženo vhodných podmínek.<sup>18</sup>

Domnívám se, že pokud Morrisonová chápe počítačové simulace příliš široce a v podstatě nedělá rozdíl mezi počítačovou simulací a během libovolného počítačového kódu, pak jsou výše uvedené názory pochopitelné. V případě, že by ale byly počítačové simulace vymezeny mnohem úžeji, což by se dalo očekávat i vzhledem k tomu jakou pozornost věnuje Morrisonová analýze vazby simulací na modely a jejich matematickou formalizaci, pak by mohl být její cíl formulován mnohem obecněji a univerzálněji. Domnívám se, že počítačové simulace nelze v tomto smyslu chápat jako libovolný počítačový kód, který je zpracován digitálním zařízením, ale spíše jako matematickou

<sup>14</sup> Margaret MORRISON, *Reconstructing Reality: Models, Mathematics, and Simulations*. New York: Oxford University Press 2015.

<sup>15</sup> *Ibid.*, s. 248.

<sup>16</sup> *Ibid.*

<sup>17</sup> *Ibid.*, s. 249.

<sup>18</sup> *Ibid.*, s. 247.

realizaci určitého (např. fyzikálního) modelu, pro který jsou stanoveny základní rovnice, počáteční podmínky a časový vývoj s tím, že se sleduje vývoj určitých vlastností modelu v čase, většinou v závislosti na různém nastavení jednotlivých parametrů modelu. Počítačovou simulací tak nemůže být libovolný kód pro digitální zařízení, stejně tak jako fyzikální teorií nemůže být pouze axiomatizovaný systém jejích základních postulátů. Stejně tak jako potřebuje fyzikální teorie kromě své axiomatizace i nějakou empirickou interpretaci, vyžaduje počítačová simulace kromě syntaktického záznamu v daném programovacím jazyku i sémantickou interpretaci simulovaného modelu. Ani to ale nestačí. Počítačová simulace není jen dobře navrženým a matematizovaným modelem včetně své interpretace, ale počítačová simulace vyžaduje svou realizaci, tj. spuštění kódu na daném zařízení a v mnoha případech i dynamickou grafickou vizualizaci. Tento požadavek sice není vždy explicitně vyjádřen, ale lze ho objevit v jednotlivých definicích implicitně. Např. Humphreys formuluje svou *pracovní definici* pro simulace následovně: „Počítačová simulace je každá počítačově-implementovaná metoda pro zkoumání vlastností matematických modelů, kde jsou analytické metody nedosažitelné.“<sup>19</sup> V jednom ze tří upřesnění definice potom dodává: „Aby něco bylo počítačovou simulací, musí být celý proces mezi vstupem a výstupem dat spuštěn na počítači.“<sup>20</sup> Explicitní zdůrazňování realizace procesu simulace je důležité i z jiného hlediska. Protože se počítačové simulace týkají většinou takových matematických modelů, pro něž neexistují analytické metody,<sup>21</sup> je realizace procesu simulace v takovém případě skutečným výzkumem, objevováním v pravém smyslu slova, tj. něčím, co není a nemůže být známo mimo proces simulace samotný. V tomto smyslu jde skutečně o *zkoumání neznámého*.

<sup>19</sup> HUMPHREYS, „Computer Simulations,“ s. 501.

<sup>20</sup> *Ibid.*, s. 502. Pro upřesnění dodejme, že přestože mnoho autorů trvá na prostředí počítače při počítačové simulaci, může být takový požadavek vhodně zobecněn tak, že simulace jako proces musí být realizována na zařízení, jež realizaci simulačního procesu umožňuje. V zásadě se tím pokryjí i případy analogových a hybridních počítačů a simulací na analogových počítačích a případně i poněkud bizarní možnost realizace digitálního počítače mechanickými prostředky (např. hydraulickými ventily) na základě univerzálních logických členů (hradel) NAND a NOR.

<sup>21</sup> Výše vymezuje Humphreys počítačové simulace sice výhradně na takové matematické modely, které nemají analytické řešení, ale není důvod považovat za simulace i širší třídu matematických modelů. Obdobnou výhradu vzhledem k Humphreysově „pracovní definici“ vznáší i Stephan HARTMANN ve stati „The World As a Process,“ když upozorňuje na to, že počítačové simulace jsou výhodné (např. z hlediska vysvětlení, názornosti a vizualizace) i v takovém případě, kdy existují analytická řešení.

Odlíšný, nicméně podstatný aspekt počítačových simulací, se snaží v diskusi s Humphreysem zdůraznit Stephan Hartmann, který poukazuje k tomu, že „pracovní definice“ nedostatečně reflektuje dynamiku a imitaci počítačových simulací a navrhuje následující korekci: „*Simulace imituje daný proces nějakým jiným procesem. V této definici termín ‚proces‘ odkazuje výhradně k nějakému objektu nebo systému, jehož stav se mění v čase. Pokud simulace běží na počítači, nazývá se počítačovou simulací.*“<sup>22</sup> Hartmannovo zdůraznění mimetického charakteru počítačových simulací později zdůrazňují i Hughes<sup>23</sup> a Winsberg<sup>24</sup> a Hartmannovy námítky nakonec přijímá i Humphreys<sup>25</sup> a koriguje jimi svou původní „pracovní definici“ simulace následovně:

„Systém S umožňuje „věrnou simulaci“ (*core simulation*) objektu nebo procesu B právě tehdy, když S je konkrétním výpočetním zařízením, jež poskytuje řešení modelu v čase, a správně tak reprezentuje B dynamicky, nebo staticky. Jestliže takový počítačový model užívaný systémem S správně reprezentuje i strukturu reálného systému R, pak S umožňuje „věrnou simulaci“ systému R vzhledem k B.“<sup>26</sup>

Termínem „věrná simulace“ nazývá Humphreys časovou závislost výpočetního procesu, tj. něco, co je skutečně podstatou a „jádem“ simulace a co jiné způsoby reprezentace (např. syntaktické nebo sémantické teorie, modely, výzkumné programy nebo paradigmaty) nejsou schopny zachytit.<sup>27</sup>

Úvahy o počítačových simulacích jako aktivitě, která leží někde mezi experimentální činností a teoretizováním a také těsná vazba simulací na modely pochopitelně navazuje na pozornost, která byla těmto otázkám věnována již v epistemologicko-metodologických otázkách 80. let spojených s idealizací a modelováním. Umístění simulace, jako zcela nového způsobu vědecké aktivity, do metodologické geografie mezi teorií a experiment<sup>28</sup> vede k reflexi a oživení Hackingovy myšlenky odmítající tradiční dichotomii mezi

<sup>22</sup> HARTMANN, „The World as a Process: Simulations in the Natural and Social Sciences.“ In: HEGSELMANN R. et al. (eds.), *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, Theory and Decision Library*. Dordrecht: Kluwer 1996, s. 83 (77–100).

<sup>23</sup> R. I. G. HUGHES, „The Ising Model, Computer Simulation and Universal Physics.“ In: MORGAN, M. – MORRISON, M. (eds.), *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge: Cambridge University Press 1999, s. 97–145.

<sup>24</sup> WINSBERG, „Simulated Experiments.“

<sup>25</sup> HUMPHREYS, *Extending Ourselves*, s. 108.

<sup>26</sup> *Ibid.*, s. 110.

<sup>27</sup> *Ibid.*, s. 109.

<sup>28</sup> WINSBERG, „Simulated Experiments,“ s. 117.



teorií a experimentem<sup>29</sup> a analýze role modelů ve vědě v myšlenkové tradici u autorů jako je Hacking, Cartwright, Giere, Morrison, Morgan a další.

Již Hacking a Cartwrightová<sup>30</sup> se na počátku 80. let snažili tradiční distinkci mezi teorií a experimentem zpochybnit různě radikálním způsobem. Např. Hacking s odvoláním na C. W. F. Everitta navrhl nahradit tuto distinkci následující strukturou: spekulace, kalkulace a experiment.<sup>31</sup> Vzápětí ale přiznal, že i takové rozdělení je příliš konzervativní a všiml si toho, že nezačínáme se spekulací, kterou postupně formujeme tak, aby z ní mohly být experimentální testy dedukovány. Mezi spekulací (teoretizováním) a experimentálními testy „leží enormně rozsáhlá zprostředkující aktivita, nazvaná nejlépe – modelování (*model-building*)“.<sup>32</sup>

Podobně i Cartwrightová ve svém antirealistickém postoji navrhuje přijmout místo známého „covering law“ modelu vědeckého vysvětlení, její tzv. „simulakrum“ koncepci. Jak sama zdůrazňuje, není to běžné slovo, ale vyjadřuje přesně to, co má na mysli.

Simulakrum je něco, co má pouze formu nebo vzhled jisté věci, aniž by to zároveň disponovalo její substancí nebo jejími vlastními kvalitami. Podle simulakrum koncepce spočívá vysvětlení jevu v zkonstruování modelu, který přizpůsobí (*fits*) jevu teorii. Fundamentální zákony teorie platí o objektech v modelu a jsou užity k odvození jejich chování. Ale objekty v modelu mají pouze „formu nebo vzhled věci“ a ve velmi silném smyslu, ne jejich „substance nebo vlastní kvality“.<sup>33</sup>

Přestože Cartwrightová sleduje svou simulakrum koncepcí mnohem hlubší a kontroverznější filosofické cíle (tj. především odmítnutí „covering law“ modelu vědeckého vysvětlení, jenž v principu předpokládá existenci jednoho „správného“ vysvětlení pro každý jev, a jeho nahrazení pluralismem možných vysvětlení zakládajících se na různě aproximovatelných modelech), lze její simulakrum koncepci v tomto ohledu považovat za velice výstižnou a inspirativní.<sup>34</sup>

<sup>29</sup> Ian HACKING, *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Science*. New York: Free Press 1983.

<sup>30</sup> Nancy CARTWRIGHT, *How the Laws of Physics Lie*. Oxford: Oxford University Press 1983.

<sup>31</sup> HACKING, *Representing and Intervening*, s. 212.

<sup>32</sup> *Ibid.*, s. 216.

<sup>33</sup> CARTWRIGHT, *How the Laws of Physics Lie*, s. 17.

<sup>34</sup> Možná je zde nějaká hlubší výsledovatelná spojitost s Baudrillardovou koncepcí představenou v jeho knize *Simulacrum and Simulation*, která vyšla také v roce 1983, ale nechci tuto možnost v této stati nijak rozvíjet.

Mary Morganová a Margaret Morrisonová<sup>35</sup> pak dále rozvíjejí myšlenku metodologického postavení modelů v rámci vědy a snaží se prokázat, že modely sehrávají roli kritických nástrojů instrumentální povahy a

vykazují určité vlastnosti, které nám umožňují zacházet s nimi jako s technologií. Poskytují nám nástroje výzkumu a dávají uživateli potenciál učit se o světě, nebo o teoriích, nebo o obojím. Modely v důsledku jejich autonomních a reprezentačních vlastností a schopnosti ovlivnit vztah mezi vědeckými teoriemi a světem mohou figurovat jako schopní agenti v procesu učení. Tedy modely jsou obojí, prostředky i zdroje vědění.<sup>36</sup>

Tato instrumentální pozice není oživením původního klasického instrumentalismu, který chápal teorie jako pouhé nástroje pro získávání správných čísel a zároveň popíral jakékoli realistické vazby mezi teorií a skutečným světem. Instrumentálnost tohoto přístupu spočívá v perspektivě, která se snaží nahlédnout status modelů vědy jako „zprostředkujících nástrojů“ (*mediating instruments*) propojujících svět s teoretickým věděním. Dosaďovací pojetí modelu jen jako prostředku pro aplikování teorie nebo modelu ve smyslu zjednodušení teorie, je tak překonáno, protože nepřesně vyjadřuje skutečnou roli modelů ve vědeckém bádání. Modely by tak neměly být nadále chápány jako podřízené teorii a datům při produkci vědění, ale spíše naopak „modely propojují měřicí nástroje, experimenty, teorie a data, jako jedna z esenciálních ingrediencí v praxi vědy.“<sup>37</sup>

Tento stručný náhled na instrumentální pojetí modelů je plně aplikovatelný i na simulace. Mají-li být modely skutečně nástroji výzkumu, musí něco reprezentovat. Je tedy třeba „odlišit instrumenty, které mohou být užity čistě instrumentálním způsobem k provedení něčeho, a instrumenty, které mohou být také použity jako výzkumný nástroj pro učení se něčemu.“<sup>38</sup> A právě jeden z aspektů, v jakém může model něco reprezentovat je reprezentace prostřednictvím procesu simulace.<sup>39</sup> Pozoruhodné je v tomto smyslu hledání epistemologicko-metodologické pozice pro simulace, snaha pochopit míru nezávislosti modelů a simulací na teorii a experimentální činnosti. Morrisonová chce zdůvodnit tuto míru nezávislosti koncepcí modelů jako *autonomních agentů* ve vědecké aktivitě a bádání. Autonomie je podle

<sup>35</sup> Mary MORGAN – Margaret MORRISON (eds.), *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge: Cambridge University Press 1999.

<sup>36</sup> MORGAN – MORRISON (eds.), *Models as Mediators*, s. 35.

<sup>37</sup> *Ibid.*, s. 36.

<sup>38</sup> *Ibid.*, s. 11.

<sup>39</sup> *Ibid.*, s. 28.

jejího názoru výsledkem relativní nezávislosti při *konstrukci* modelu, která vede i k *funkční* nezávislosti.<sup>40</sup> Opět lze říci, že to platí nejen o modelech, ale specificky i o počítačových simulacích.

Počítačové simulace tak mají svou vlastní *autonomii*, která je do určité míry nezávislá jak na teorii, tak na experimentu. Winsberg sice nesouhlasí plně se snahou Morganové a Morrisonové, aby byly modely chápány jako *autonomní agenti* (*autonomous agents*) a navrhuje užít spíše termínu *semi-autonomní*, protože to lépe vystihuje nejen jejich relativní samostatnost, ale také určitou závislost na teorii.<sup>41</sup> Ať již autonomní či semiautonomní, připadá nám toto zdůraznění relativní samostatnosti modelů plně výstižné i pokud se jedná o simulace. Zdůrazňují-li Morganová a Morrisonová autonomní roli modelů ve vědecké práci, chtějí ukázat „jak [modely] fungují jako *instrumenty* výzkumu [...] Je to přesně tak, protože modely jsou částečně nezávislé na teorii a na světě tím, že mají autonomní prvek a mohou být tedy užity jako nástroje výzkumu v obou oblastech.“<sup>42</sup> Modely i simulace jsou tedy autonomní ve své relativní nezávislosti na teorii i světě. S jistou nadsázkou lze říci, že obývají svůj vlastní svět, v kterém jsou legitimními agenty, ale zároveň umožňují vědecký výzkum tím, že něco vypovídají o propojenosti světa a teoretického vědění. V obdobném smyslu se i Winsberg snaží ukázat, jak je třeba chápat vazbu mezi simulovaným modelem a teorií. Říká, že model je utvářen na základě idealizací, aproximací a dokonce i vědomých falsifikací a výsledkem je „model, který je užít k simulaci, sice jako potomek teorie, ale nečistokrevný potomek (*mongrel offspring*). Na jeho utváření se tak podstatně podílejí i praktické potřeby výpočetních omezení a informace ze širokého okruhu jiných zdrojů.“<sup>43</sup>

Zmínovanou autonomií získávají modely a simulace tím, že se tedy do jisté míry zbavují své závislosti na teorii i světě a obývají tak autonomně svůj vlastní svět, v kterém „žijí svým vlastním životem.“ Pro podporu této perspektivy pohledu na simulace argumentuje Winsberg Hackingovou<sup>44</sup> představou o *vlastním životě* experimentů:

<sup>40</sup> *Ibid.*, s. 43.

<sup>41</sup> WINSBERG, „Simulated Experiments,“ s. 106.

<sup>42</sup> MORGAN – MORRISON (eds.), *Models as Mediators*, s. 10.

<sup>43</sup> WINSBERG, „Simulated Experiments,“ s. 108.

<sup>44</sup> Ian HACKING, „Do Thought Experiments Have a Life of Their Own?“ In: FINE, A. – FORBES, M. – OKRUHLIK, K. (eds.), *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association. 1992. Vol. 2.* East Lansing, MI: Philosophy of Science Association 1992, s. 302–310.

„Experimenty žijí svým vlastním životem. [...] Experimenty jsou organické, vyvíjí se, mění a přitom si udržují dlouhodobý rozvoj, který nám umožňuje mluvit o nich jako o opakujících se a replikujících se experimentech. [...] Experimenty jakoby měly život: zrají, vyvíjí se, adaptují se, nejsou jen recyklovány, ale docela skutečně jsou zlepšovány (*retooled*).“<sup>45</sup>

Zatímco Hacking zmiňuje tuto perspektivu, aby odlišil experimenty od myšlenkových experimentů, které podle jeho názoru tuto autonomii vlastního života postrádají, Winsberg chápe simulace a simulační postupy, jako formu experimentální činnosti a přisuzuje jim obdobným způsobem jejich vlastní život. Podle jeho názoru získávají simulační modely svou důvěryhodnost nejen díky teorii, na jejímž základě jsou konstruovány, ale i na základě dřívější důvěryhodnosti, kterou získala tradice technik budování takových modelů. V tomto smyslu jsou simulační techniky modelování podobné jiným komplexním vědeckým instrumentům.<sup>46</sup>

Také Humphreys se hlásí k tzv. *metafoře mikroskopu*, když tvrdí, že „výpočetní zařízení jsou numerické analogie empirických nástrojů: rozšiřují naše omezené výpočetní schopnosti podobně, jako empirické instrumenty rozšiřují naše omezené observační schopnosti.“<sup>47</sup> Stejně tak jako např. dalekohled a mikroskop umožnily rozšíření pozorovacích schopností člověka, sehrává i počítačová simulace roli nástroje, jenž „rozšiřuje“ naše schopnosti poznání. Humphreys se snaží tuto metaforu dále generalizovat a podrobně diskutuje tezi, že výpočetní metody mohou být srovnány s mikroskopem různých schopností rozlišení.<sup>48</sup> Myšlenka augmentace lidských schopností je jistě filosoficky zajímavá, ale z hlediska simulace není nijak specifická. Simulace není charakteristická tím, že rozšiřuje omezené lidské schopnosti počítání a modelování. Je jen jedním z mnoha instrumentů, které to umožňují. V čem tedy můžeme hledat metodologickou specifickou simulací?

Především je nutné zdůraznit, že tradiční pohled na experiment a simulaci, který předpokládal, že „hlavní odlišnost spočívá v tom, že zatímco v experimentu kontrolujeme skutečný předmět zájmu, [...] v simulaci experimentujeme spíše s modelem než s jevem samým,“<sup>49</sup> byl kritizován

<sup>45</sup> HACKING, „Do Thought Experiments Have a Life of Their Own?“ s. 307.

<sup>46</sup> WINSBERG, „Simulated Experiments,“ s. 122. Winsberg zde srovnává techniku simulace a modelování s přístroji jako je mikroskop nebo bublinková komora, které popisují HACKING (1988) a GALISON (1996).

<sup>47</sup> HUMPHREYS, *Extending Ourselves*, s. 116.

<sup>48</sup> *Ibid.*, kap. 4.3.

<sup>49</sup> Nigel GILBERT – Klaus G. TROITZSCH, *Simulation for the Social Scientist*. Philadelphia: Open University Press 1999, s. 14.

a odmítnut autory jako Parkerová, Guala a Winsberg. Tito autoři považují za naivní myslet si, že experimentátoři zkoumají přírodu přímým způsobem, zatímco ti, kteří se zabývají simulacemi, zkoumají pouze modely. Navíc se z této naivně „zdůvodněné“ pozice následně odvíjejí hodnotící kritéria, která považují experimenty za epistemicky privilegované vzhledem k simulacím. Parkerová ve své disertační práci<sup>50</sup> polemizuje s podobně tradičním zdůvodněním výše uvedeného pohledu u Morganové, která tvrdí, že „tradiční experimenty“ mají částečně větší epistemický vliv než simulace, protože mají větší potenciál zpětně působit na svět.<sup>51</sup> Parkerová i Winsberg shodně odmítají tuto privilegovanost experimentů před simulacemi a poukazují na to, že záleží především na detailech uspořádání experimentů a simulací, jež jsou rozhodující pro spolehlivost získaných výsledků a nikoliv na nějaké domnělé vnitřní epistemologické privilegovanosti.<sup>52</sup> Domnívám se, že takový názor bude podpořen podrobnější diskusí tří simulací v závěru této stati. Ve všech se totiž ukazuje, že to, čím se tradičně myslí „běžný experiment“, není v případě atmosféry, částicové fyziky a kosmologie možné, neboť uspořádání experimentu je v takových případech neeliminovatelně propojeno se simulacemi. Rozhodující jsou tak spíše specifické znalosti a schopnosti, které umožňují uspořádání modelu na základě existujících teorií, protože neexistují nějaké obecné principy jak postupovat v těchto případech od teorie k relevantnímu modelu.

Johannes Lenhar<sup>53</sup> vidí tuto specifickou v kooperaci mezi experimentem a modelováním a v přímém ovlivňování modelu:

Proces simulačního modelování má formu ‚explorativní kooperace‘ mezi experimentováním a modelováním, a tento charakteristický způsob modelování činní simulace autonomními zprostředkovateli specifickým způsobem: umožňuje jevům a datům mít přímý vliv na model. Tehdy získává experimentování specifický význam.<sup>54</sup>

<sup>50</sup> Wendy S. PARKER, „Does Matter Really Matter, s. 483–496.

<sup>51</sup> Viz Mary MORGAN, „Model Experiments and Models in Experiments.“ In: MAGNANI, L. – NERSESSIAN, N. (eds.), *Model-Based Reasoning: Science, Technology, Values*. New York: Kluwer 2002, s. 41–58; Mary MORGAN, „Experiments without Material Intervention: Model Experiments, Virtual Experiments and Virtually Experiments.“ In: RADDER, H. (ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press 2003, s. 216–235.

<sup>52</sup> WINSBERG, „A Tale of Two Methods.“ *Synthese*, roč. 169, 2009, č. 3, s. 584, 591 (575–592).

<sup>53</sup> Johannes LENHARD, „Computer Simulation: The Cooperation between Experimenting and Modeling.“ *Philosophy of Science*, roč. 74, 2007, č. 2, s. 176–194.

<sup>54</sup> LENHARD, „Computer Simulation,“ s. 176–177.

Lenhard považuje „explorativní kooperaci“, tj. numerické experimenty v modelování, za rozhodující pro novou experimentální praxi simulace a centrální prvek metodologie simulace. Podle jeho názoru vede explorativní kooperace k enormnímu rozšíření prostoru pro modely, kdy modelování globální dynamiky atmosféry je pouze jeden z mnoha případů.<sup>55</sup>

Pokusím se nyní ukázat na třech konkrétních případech jak rozumět specifickému postavení simulací v epistemologicko-metodologickém kontextu. Prvním případem je Lenhardova analýza simulace atmosféry,<sup>56</sup> která ho přivedla k termínu explorativní kooperace. Druhým je analýza role simulací při objevu Higgsova bosonu v Cernu 2012, kterou podrobně rozebírá Morrisová ve své knize *Reconstructing Reality*.<sup>57</sup> Posledním je pak můj rozbor kosmologických simulací z knihy *Anomálie, ad hoc hypotézy a temné stránky kosmologie*.<sup>58</sup>

### 1. Simulace atmosféry

Zmiňovali jsme již, že pro libovolnou simulaci je rozhodující úspěšné napodobení pozorovaných jevů. Specifičnost propojení teoretických a experimentálních předpokladů v případě simulace spočívá v tom, že simulace jevu realizována ve virtuálním prostředí a většina vlastností jevu je odvozována z matematického modelu. Avšak zároveň je také nutné takový model „kalibrovat“ a experimentálně nastavit mnoho tzv. „volných parametrů“ modelu, aby simulované výsledky maximálně korespondovaly s reálné pozorovanými jevy. „Volné parametry“ jsou na výchozí teorii více méně nezávislé, v mnoha případech jsou známy pouze na základě experimentálně zjištěných hodnot, přičemž tyto hodnoty jsou pro úspěšnost modelu rozhodující. Právě této skutečnosti si všímá Lenhard, když tvrdí, že úspěšné modelování a simulování atmosférických dějů, i když je silně vázáno na teoretické modely, těží z metodologických přístupů motivovaných imitováním jevů nezávisle na teorii.<sup>59</sup> Lenhard má na mysli tu skutečnost, že simulační model je korigován nejen teoretickými předpoklady, ale i snahou vyhovět imitačním požadavkům a napodobit co nejdříve simulovaný jev. V případě simulace atmosféry má pro to přesvědčivý důkaz – Arakawův

<sup>55</sup> *Ibid.*, s. 182–183.

<sup>56</sup> Viz *ibid.*

<sup>57</sup> MORRISON, *Reconstructing Reality*.

<sup>58</sup> Vladimír HAVLÍK, *Anomálie, ad hoc hypotézy a temné stránky kosmologie*. Plzeň – Praha: Pavel Mervart 2015.

<sup>59</sup> LENHARD, „Computer Simulation“, s. 184.

trik. Pro účely této statě není třeba zacházet do přílišných podrobností. Po-  
 inta spočívá v tom, že první modely atmosféry, přestože byly po jistou dobu  
 adekvátním zobrazením atmosférických dějů, nebyly stabilní a dočasně  
 stabilní vzory v simulované atmosféře se rozpadaly zhruba po čtyřech týd-  
 nech simulace do chaotického chování. Japonský meteorolog Akio Arakawa  
 nepostupoval při řešení tohoto problému podle standardních postupů při  
 utváření matematického modelu atmosféry, ale nahradil jeden z operátorů  
 (tzv. Jacobiho operátor) svým vlastním matematickým konstruktem, který  
 stabilizoval chaotické chování systému dlouhodobě. Je třeba poznamenat,  
 že toto nahrazení nebylo úplně svévolné, protože byl Arakawa schopen  
 později svou modifikaci dokázat a zdůvodnit matematicky.<sup>60</sup> Metodologicky  
 je to ale přesvědčivý příklad toho, jak je simulovaný model veden nejen  
 teoretickými předpoklady a jejich přepisem do modelu, ale i simulovanou  
 podobností s jevem samotným. Přitom je nutné zdůraznit, že takové zásahy  
 do modelování simulace nejsou „statické“, ale spíše mají povahu právě oné  
 kooperující dynamiky, kterou má zřejmě na mysli Lenhard, když zdůrazňuje  
 „explorativní kooperaci“.

Jinými slovy, vazba simulace či modelu na teorii není rigidní a v zásadě  
 neexistuje jednotný algoritmus jak odvozovat modely z teorii. To je také já-  
 drem argumentace Cartwrightové<sup>61</sup> při její snaze odmítnout fundamentální  
 zákony ve prospěch fenomenologických zákonů, protože z teorie lze odvodit  
 mnoho různých a často i protikladných modelů. Simulace založené na tako-  
 věto „samostatnosti“ modelů obývají tedy v jistém smyslu „svůj“ vlastní svět  
 a vyžadují tedy epistemologicko-metodologickou reflexi této pozice. Jestliže  
 lze ale v současné době většinu jevů simulovat tímto způsobem, vzniká  
 otázka po relevantnosti a průkaznosti těchto výsledků simulací. Co je při  
 simulaci vlastně testováno a ověřováno? Je simulace ověřením teoretických  
 předpokladů, které daný jev vysvětlují, nebo je pouze ověřením důsledků,  
 ke kterým vede vhodný mix výchozích teoretických předpokladů a sofisti-  
 kované kalibrace množiny volných parametrů? Jak se simulace vůbec může  
 podílet na nějakém novém objevu?

## 2. Simulace a objev Higgsova bosonu

Již jsme se zmínili, že minimálně v některých případech jsou simulace zkou-  
 máním neznámého a mohou být zdrojem nového vědění o simulovaných

<sup>60</sup> Další podrobnosti viz *ibid.*

<sup>61</sup> CARTWRIGHT, *How the Laws of Physics Lie.*

objektech. Mohou ale být také zdrojem objevů nových dosud neprokázaných entit? Intuice nás vede k odmítnutí takové teze, protože prostě předpokládáme, že simulace sice mohou být zdrojem nových poznatků, ale pro existenční tvrzení o nějaké entitě bychom vyžadovali experimentální data či měření této entity samé, spíše než jen simulovaná data. Právě tuto sugestivní otázku klade Morrisonová v souvislosti s objevem Higgsova bosonu a domnívá se, že takový „ontologický efekt“ nemůže mít v tomto případě epistemologickou autoritu.<sup>62</sup> Pointa v tomto diskutovaném případě spočívá v tom, že „simulovaná data jsou kombinována se signálními daty [experimentu] při analýze různých událostí, což vede k praktické nemožnosti ostře odlišit mezi simulací a experimentem. Simulace je stejně tak součástí experimentu jako signální data.“<sup>63</sup>

Opět není nutné zacházet do přílišných podrobností ohledně kalibrace, měření nebo vyhodnocování dat asi nejsložitějšího současného vědeckého zařízení. Podrobnosti lze nalézt ve zmiňované knize Morrisonové. Tedy jen stručně:

Úkolem počítačového softwaru je filtrovat data přicházející z detektoru, monitorovat výkon detektoru, kalibrovat a řídit komponenty detektoru, simulovat reakce detektoru na známé fyzikální procesy a vykonávat uživatelskou analýzu, která vede k aktuálním fyzikálním výsledkům. Všechno to se odvíjí od vysoce specifických simulací, aby byl zajištěn přesný běh finálních programů, které vytvářejí základ pro experimentální hledání.<sup>64</sup>

Není naším cílem nyní zpochybnit tento výčet tím, že jistě ne všechny probíhající výpočetní procedury jsou simulacemi, protože i přes takovou možnost, zde zůstává racionální jádro v tom, že „bez simulace bychom nevěděli nic“.<sup>65</sup> Rekonstrukce objevu Higgsova bosonu ukazuje, že ve všech klíčových okamžicích experimentu jsou simulovaná data stejně rozhodující jako data signální. Zestručněme poněkud souhrn Morrisonové do hlavních bodů: nejprve byla provedena simulace Higgsova bosonu (jeho produkce a rozpad) podle kalkulací standardního modelu částic. Pak byly vytvořeny algoritmy, které selektovaly zajímavé částice v rozpadech a zároveň musely být také uváženy všechny ostatní „background“ fyzikální procesy vedoucí k těm samým částicím – ty musely být také simulovány a selektovány. Až

<sup>62</sup> MORRISON, *Reconstructing Reality*, s. 289.

<sup>63</sup> *Ibid.*

<sup>64</sup> *Ibid.*, s. 294.

<sup>65</sup> *Ibid.*, s. 297.



teprve posledním krokem bylo porovnání simulačních dat s aktuální kolekcí dat z detektoru, které byly také získány s využitím simulace.<sup>66</sup> Jak poznamenává Morrisonová, simulace, rekonstrukce a analýza probíhají jako proces v jednu a tu samou dobu se selekcí a transformací „syrových“ signálních dat.<sup>67</sup> Nelze proto jednoduše oddělit nesimulované a simulované části experimentu, protože jsou vzájemně provázány v mnoha úrovních.

Tento případ není tedy jen čistou simulací jevu jako v předchozím případě simulace atmosférických jevů. Ukazuje však, nakolik je simulace nezbytná i pro sofistikovaná „empirická“ pozorování a rozhodování o existenci či neexistenci předpokládaných entit. Dříve naznačené požadavky po nové metodologii a nutnosti opuštění tradiční dichotomie teorie-experiment tak zde získávají konkrétní perspektivu.

### 3. Simulace v kosmologii

Posledním diskutovaným případem jsou kosmologické simulace, které se zvláště v poslední době zdají být velice úspěšné. Snahou kosmologů a astrofyziků je reprodukovat růst kosmických galaktických struktur, které můžeme pozorovat v současném vesmíru. Simulovaný model je utvořen na základě předpokládaného stavu rozložení záření, temné hmoty atd. a prochází postupně řadou kroků v čase, přičemž se při výpočtech jednotlivých stavů uplatňují předpokládané fyzikální zákonitosti, jimiž se řídil vývoj skutečného vesmíru. Skončí-li taková simulace u struktur podobných těm, které pozorujeme v současném vesmíru, pak předpokládáme, že je takový model věrohodný a ospravedlňuje jak předpoklady, tak fyzikální zákonitosti, které se uplatnily i při vývoji skutečného vesmíru. Simulace utváření struktury vesmíru na takových škálách je výpočetně velice náročná, a přestože pokusy o simulace galaktických struktur nebyly výjimečné, jejich výsledky nebyly přesvědčivé, protože fyzikální modely byly numericky nepřesné a neúplné.<sup>68</sup> První velké simulace se zaměřovaly na utváření velkorozměrných struktur temné hmoty MILLENNIUM Run 2005;<sup>69</sup> Bolshoi Simulation 2010<sup>70</sup> na zá-

<sup>66</sup> *Ibid.*

<sup>67</sup> *Ibid.*, s. 295.

<sup>68</sup> Mark VOGELBERGER *et al.* „Properties of Galaxies Reproduced by a Hydrodynamic Simulation.“ *Nature*, sv. 509, 2014, s. 177–182.

<sup>69</sup> Volker SPRINGEL *et al.*, „The Cosmological Simulation Code GADGET-2.“ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, roč. 364, 2005, č. 4, s. 1105–1134.

<sup>70</sup> Anatoly KLYPIN – Sebastian TRUJILLO-GOMEZ – Joel PRIMACK, „Halos and Galaxies in the Standard Cosmological Model: Results from the Bolshoi Simulation.“ *The Astrophysical Journal*, sv. 740, 2011, č. 2, s. 102.

kladě stávajícího modelu vesmíru (tzv.  $\Lambda$ CDM model pracující s temnou hmotou a temnou energií). Snahy zahrnout koevoluci temné a viditelné hmoty ve vesmíru<sup>71</sup> se ale plně uplatňují až v poslední době v projektech ILLUSTRIS,<sup>72</sup> GIMIC a EAGLE.<sup>73</sup> Již v roce 2005 poznamenal v rozhovoru pro BBC Carlos Frenk, profesor fyziky na univerzitě v Durhamu a spoluautor prvních simulací, že „jsme se o vesmíru naučili mnohem více v posledních deseti nebo dvaceti letech než za dobu celé lidské civilizace. Nyní jsme schopni, díky tomu, že používáme nejvýkonnější počítače na světě, vytvořit celou kosmickou historii.“<sup>74</sup> K poněkud odlišně zaměřeným simulacím patří naopak tzv. DEUS konsorcium (Dark Energy Universe Simulation), v níž jde o simulování vlivu temné energie na formování kosmických struktur<sup>75</sup> a o případné odhalení pozorovatelných rozdílů ve stopách působení různých simulovaných podob temné energie.

Složitou vazbu teoretického a empirického v těchto případech simulačního modelování lze vysledovat v tom, že všechny simulace jsou nejen výsledkem současných teoretických představ o utváření vesmíru, ale také podrobného empirického měření kosmického mikrovlnného pozadí (CMB) sondou WMAP a Planck a dokazují tak, že model vesmíru založený na chladné temné hmotě a temné energii se stal vůdčím teoretickým paradigmatem současné kosmologie. Stávající paradigma je silně podporováno třemi přístupy – teoretickými modely, empirickými měřeními a simulacemi. V zásadě tak patří  $\Lambda$ CDM model k nejúspěšnějším modelům a završuje původní představy o gravitačním původu strukturace vesmíru. „Společně

<sup>71</sup> Volker SPRINGEL *et al.*, „Simulating the Joint Evolution of Quasars, Galaxies and Their Large-scale Distribution.“ *Nature*, sv. 435, 2005, s. 629–636.

<sup>72</sup> Mark VOGELBERGER *et al.*, „Introducing the Illustris Project: Simulating the Coevolution of Dark and visible matter in the Universe.“ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, sv. 444, 2014, č. 2, s. 1518–1547.

<sup>73</sup> Joop SCHAYE *et al.*, „The EAGLE Project: Simulating the Evolution and Assembly of Galaxies and Their Environments.“ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, sv. 446, 2015, č. 1, s. 521–554. GIMIC a EAGLE jsou projekty tzv. Virgo konsorcia pro kosmologické superpočítačové simulace, které bylo založeno v roce 1994 – nyní mezinárodního týmu vědců spojených v centrech Institutu pro počítačovou kosmologii v anglickém Durhamu a Institutu Maxe Plancka pro astrofyziku v německém Garchingu.

<sup>74</sup> Viz „Biggest Ever Cosmos Simulation.“ *BBC* [online]. 1. 6. 2005. Dostupné z: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4600981.stm>> [23. 6. 2016]

<sup>75</sup> Jean-Michel ALIMI *et al.*, „Imprints of Dark Energy on Cosmic Structure Formation: I. Realistic Quintessence Models and the Non-Linear Matter Power Spectrum.“ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, sv. 401, 2010, č. 2, s. 775–790. Irène BALMÈS *et al.*, „Imprints of Dark Energy on Cosmic Structure Formation: III. Sparsity of Dark Matter Halo Profiles.“ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, sv. 437, 2014, č. 3, s. 2328–2339.

s teorií inflace je model zdrojem jasných predikcí počátečních podmínek pro formování struktur a předpovídá jejich hierarchický růst působením gravitační nestability.<sup>76</sup>

Zmíněné modely jsou založeny na tzv. kosmologických hydrodynamických simulacích  $\Lambda$ CDM a představují v současné době nejlepší způsob pochopení formování galaxií a clusterů uvnitř kosmické sítě gravitačního skeletonu temné hmoty. Označují se jako semi-analytické, což znamená, že nelineární rovnice, které se týkají komplexních problémů utváření galaxií, jsou řešeny užitím vhodné kombinace analytických aproximací a empirických kalibrací modelu na základě mnohem detailnějších numerických řešení vyvíjených od konce sedmdesátých let minulého století. Podotkněme, že tato tradice modelování nese znaky, o kterých mluví Hacking,<sup>77</sup> když argumentuje ve prospěch „vlastního života“ experimentů a jejich evoluce, a podobně také Winsberg<sup>78</sup> v souvislosti s důvěryhodností modelů, již těží z budování technik v průběhu své historie.

Pro vyvíjené kosmologické modely tak obecně platí, že začínají v nějakém počátečním stavu vesmíru krátce po velkém třesku a aplikací fyzikálních principů se snaží dospět k formování galaxií s požadovanými vlastnostmi v průběhu evoluce vesmíru až do současné doby.<sup>79</sup> Podle autorů simulace ILLUSTRIS se tak podařilo nejen věrně reprodukovat „kosmickou síť“ galaktických struktur, ale díky zpřesnění numerických parametrů a úplnosti fyzikálního modelu také dospět k požadované rozmanitosti populací eliptických a spirálních galaxií. Předchozí modely také nebyly úspěšné v propojení evoluce plynu a hvězd v menších měřítkách až do současné epochy. Na rozdíl od nich začíná simulace ILLUSTRIS dvanáct miliónů let po velkém třesku a prochází zrychleně třináct miliard let kosmické evoluce s dvanácti miliardami rozlišitelných prvků v krychli o délce strany 106.5 megaparseků.<sup>80</sup> Model je zajímavý tím, že poskytuje pozoruhodnou *shodu modelu a skutečnosti* v těchto ohledech: reprodukuje pozorované rozložení typů galaxií v clusterech a charakteristické rozložení vodíku i těžkých prvků v galaxiích, a to ve velkých i malých měřítkách. V neposlední řadě zaujme model nejen shodou v těchto kvantitativních ukazatelích, ale daří se mu

<sup>76</sup> SPRINGEL *et al.*, „Simulating the Joint Evolution,“ s. 1.

<sup>77</sup> HACKING, *Representing and Intervening*.

<sup>78</sup> WINSBERG, „Simulated Experiments.“

<sup>79</sup> Viz Andrew J. BENSON, „Galacticus: A Semi-Analytic Model of Galaxy Formation.“ *New Astronomy*, roč. 17, 2012, č. 2, s. 175–197.

<sup>80</sup> VOGELSBERGER *et al.*, „Properties of Galaxies.“

také dosáhnout obdivuhodné optické a obrazové shody při srovnání snímků z Hubbleova teleskopu s výslednou obrazovou simulací.

Naše výsledky tak demonstrují, že  $\Lambda$ CDM model správně popisuje rozmanitost pozorovatelných dat na malých a velkých měřítkách v našem vesmíru. Predikuje také silný škálově závislý vliv baryonových jevů na distribuci temné hmoty na úrovni, která má významné důsledky pro budoucí přesné testy kosmologie.<sup>81</sup>

I Vogelsberger je v tomto případě přesvědčen, že shoda modelu a skutečnosti ospravedlňuje použití kauzálních mechanismů, jež vedou k jevovým důsledkům. „Mnoho ze simulovaných galaxií je ve velmi dobrém souladu s galaxiemi ve skutečném vesmíru. A to nám říká, že základní porozumění tomu, jak vesmír funguje, musí být *správné a úplné*.“<sup>82</sup>

Taková tvrzení se zdají být v souladu s následující logikou simulace:

- Můj systém je *inspirován* jevem  $X$
- Můj systém simuluje chování  $X$
- Tedy mechanismus, který vede ke vzniku  $X$ , je stejný jako v simulovaném systému.<sup>83</sup>

V takovém obecném případě není důležité, zda simulujeme chování inteligence v projektech AI (*Artificial Intelligence*) anebo celý vesmír v kosmologických simulacích. Z metodologického hlediska se zdá být přesvědčení vědců o výsledcích simulací neochvějně, avšak, jak upozorňuje Hamid Ekbia v souvislosti s umělou inteligencí, takový předpoklad je mylný. Bylo by lákavé si myslet, že shodují-li se jevové výsledky simulace s reálným pozorováním, jsou tím verifikovány prostředky (teorie), na jejichž základě byly výsledky odvozeny. Možná má Vogelsberger pravdu, ale obecně platí, že teorie, která dobře popisuje a vysvětluje určitou třídu jevů, nemůže být nikdy ospravedlněna pouze svým souhlasem s empiricky pozorovanými jevy. Není samozřejmě vyloučeno, že je to ta správná teorie, ale v zásadě neexistuje žádný způsob, jak vyloučit existenci nějaké alternativní teorie, která může být mnohem úspěšnější. Ani simulace tedy nemohou zvrátit základní pravidla usuzování (tj. logické struktury úvahy), induktivně-verifikační a deduktivně-falsifikační strategie. Stejně tak jako nelze pozorováním potvrdit (verifikovat) nějakou teorii, takže výsledek bude vždy jen

<sup>81</sup> *Ibid.*, s. 3.

<sup>82</sup> *Ibid.*, kurzíva V. H.

<sup>83</sup> Hamid R. EKZIA, *Artificial Dreams: The Quest for Non-Biological Intelligence*. Cambridge: Cambridge University Press 2008, s. 312.

abduktivní, tj. směřující k nejlepšímu možnému vysvětlení, je také logika simulace podřízena skutečnosti, že ať již je výsledek simulace v jakkoli přesné shodě s pozorováním, vždy tu mohou existovat alternativní (a snad i lepší) mechanismy vedoucí k identickým výsledkům. Na druhé straně by ale bylo stejně pošetilé chápat simulace jen jako konkrétní případ dávno překonané snahy o verifikaci vědeckých teorií a nezaznamenat nové otázky, jež simulace přináší do vědecké metodologie. Nechceme tedy podcenit simulaci jako vědecký nástroj soudobé vědy a zpochybnit její výsledky. Spíše naopak. Snažíme se ukázat, v čem může spočívat síla nového nástroje vědění, který tak umožňuje dříve nedosažitelné techniky testování vědeckých teorií, ale který na druhé straně sám o sobě nemůže změnit základní logický rozvrh potvrzení a falsifikace teorií.

Vogelsbergerův optimismus o správnosti a úplnosti základního porozumění skladbě a evoluci vesmíru v simulaci ILLUSTRIS tak může být poněkud korigován některými anomáliemi této simulace. Například se ukazuje, že v modelu se málo hmotné galaxie formují příliš brzy. To samozřejmě pro model není úplně fatální, protože podle Vogelsberga jednak existují možnosti, jak to napravit, a jednak můžeme pochopit, co se v modelu děje a co se z hlediska mechanismu formování galaxií opomenulo. Jinými slovy, jde o výše zmiňované metodologické propojení teorie a experimentu, kdy simulace umožňuje porovnat různé průběhy evoluce galaxií na základě různého experimentálního nastavení jednotlivých parametrů modelu. To je další konkrétní příklad výše zmiňované „explorativní kooperace“, kdy je model konstruován nejen na základě teoretických předpokladů  $\Lambda$ CDM modelu, ale je explorativně modifikován také požadavky věrné imitace skutečného vesmíru. Proto je možné provést „zásahy“ do modelu a explorativně zjišťovat výsledky těchto zásahů. Simulace je tak v zásadě skutečným explorativním nástrojem, který umožňuje prověřovat rozličné „historie“ hypotetických vesmírů a testovat tak vliv různého nastavení počátečních podmínek, z kterých se jednotlivé historie odvíjejí. Vedoucí projektu EAGLE Joop Schaye to vyjádřil lapidárně: „Simulace umožňují astronomům ‚točit knoflíky‘ stejným způsobem, jak to činí experimentální fyzikové v laboratoři.“<sup>84</sup> V simulaci se tak propojuje experiment a teorie takovým způsobem, který neumožňuje vést jednoduchou dělicí čáru mezi těmito oblastmi. Simulace tak nepochybně přispívá k hlubšímu pochopení mechanismů, které k utváření struktur vedou, a je otázkou do jaké míry lze pak prokázat pravdivost modelu jako takového.

<sup>84</sup> SCHAYE *et al.* „The EAGLE Project,“ s. 2.

V hypotetickém případě bychom mohli uvažovat o takové simulaci, která by byla vlastně úplnou realizací jevu (tj. v tomto konkrétním případě by byl vhodným nastavením počátečních podmínek a zákonů znovu vytvořen či zrealizován alternativní vesmír ve všech detailech) a taková simulace-realizace by pak byla ospravedlněním té teorie, na níž je založena.<sup>85</sup> Problémem zůstává, jak se přesvědčit o tom, že jsme z možných teorií našli právě tu, která se na utváření našeho vesmíru skutečně podílela. Pokud bychom předpokládali, že mohou skutečně existovat alternativní teorie a nastavení výchozích podmínek, které vedou k neodlišitelným důsledkům, pak by takové alternativní koncepce byly ve svých výsledcích vzájemně neodlišitelné, a přestože by konceptuálně používaly odlišné kauzální mechanismy, nebylo by možné se přesvědčit o tom, která z nich je tou pravou teorií o vzniku našeho vesmíru. Naštěstí není taková situace příliš pravděpodobná, a nepředstavuje tedy aktuální praktické obtíže. Předpokládáme spíše, že třída odlišností jednotlivých modelů požadované rozlišení umožňuje. A i v případě, že by nastala výše zmíněná možnost skutečně neodlišitelných důsledků, byla by pak brána jako dočasná s tím, že se odlišnost v důsledcích musí projevit později, například v dosud nepozorovaných jevech. Máme-li takové závěry poněkud konkretizovat, řekněme, že jak alternativní koncepce hypotézy temné hmoty, tak i teorie MOND (tj. modifikovaná newtonovská dynamika) řeší pomocí různých kauzálních mechanismů problém nedostatku hmoty, ve snaze vysvětlit pohyb hvězd v galaxiích a galaxií v clusterech galaxií. Shodují-li se obě alternativní koncepce ve svých jevových důsledcích, pak nemůžeme rozhodnout, která z teorií pozorované pohyby ve vesmíru skutečně postihuje. Předpokládáme však, že existují i jiné pozorovatelné důsledky, které umožní jednu z kompetitivních koncepcí odmítnout, i kdyby byly zatím mimo naše pozorovací schopnosti.

Kromě toho, přestože jsou výsledky kosmologických simulací úchvatné, nedosahují zdaleka ideální úrovně. Obecně lze předpokládat, že většina simulací trpí zjednodušením, nekorektními extrapolacemi,<sup>86</sup> potřebou přijetí mnoha dodatečných předpokladů a konečně také tím, že jsou vedeny přímo k tomu výsledku, který sledují. Nutnost dosáhnout dobré imitační shody simulovaného a reálného jevu nemusí být vždy ku prospěchu věci a výše

<sup>85</sup> Podobnou úvahu rozvíjí Jorge Luis Borges v povídce, kde kartografové vytvoří mapu, která je identická s územím, jež zobrazuje. Viz Jorge Luis BORGES, „O důslednosti vědy.“ In: *Obecné dějiny hanebnosti*. Praha: Euromedia Group 2006, s. 91 (91).

<sup>86</sup> Pro nekorektní extrapolace v teoretické fyzice viz Michal KRÍŽEK, „Kritika standardního kosmologického modelu.“ *Československý časopis pro fyziku*, roč. 64, 2014, č. 6, s. 359–367; Michal KRÍŽEK, *Antigravitace*. Praha: Jednota českých matematiků a fyziků 2014.

zmiňovaný Arakawův trik může být někdy neoprávněný. Nakolik se daří simulovat jevy tak, aby to odpovídalo skutečnosti, je tak skryto v pravidlech, která simulaci řídí. Konečně skeptičtější komentátoři výše zmiňované simulace vesmíru upozorňují na to, že ačkoli je simulace obdivuhodná, nesmíme zapomínat na to, že simulované objekty, které vypadají jako galaxie, mají málo společného s fyzikou, která se skutečně podílí na jejich vzniku.

Simulace však umožňují kalibrovat jednotlivé parametry modelu a tím vedou k falsifikaci těch parametrizací, které k požadovaným důsledkům nevedou. Takové predikce nejsou úplně nové, simulace je však přivádějí k novým možnostem testování a výzkumu. Snahy predikovat důsledky teoretického modelu zde byly vždy a často vedly ve výpočtech ke kvantifikovaným omezením jednotlivých parametrů modelu, pokud měl být model ve shodě s pozorovatelnými důsledky. Například jedním z takových odhalení je podivuhodné vyladění přírodních konstant, jejichž hodnoty daly vzniknout všemu ve vesmíru od velkorozměrových struktur přes utváření galaxií a hvězd až po život. Simulace ale umožňuje mnohem těsnější propojení mezi teorií a experimentem, protože vytváří prostor pro dynamickou parametrizaci modelu jako takového – explorativní kooperaci. Umožňuje zjistit pozorovatelné důsledky pro v podstatě libovolnou konfiguraci parametrů, a objevit tak kauzální vazby jednotlivých parametrů modelu. Současné modely pro stanovení základních kosmologických parametrů využívají měření sondy WMAP a Planck, které simulační modely z devadesátých let ještě neměly k dispozici. Přesná nastavení počátečních podmínek umožňují simulovat úzkou skupinu možných konfigurací, což je praktické vzhledem k náročnosti výpočetních operací. K těmto fundamentálním kosmologickým parametrům v rámci  $\Lambda$ CDM modelů patří průměrná hustota hmoty, temné energie a baryonické hmoty v jednotkách kritické hustoty při nulovém rudém posuvu, Hubbleův parametr a několik dalších parametrů.<sup>87</sup> V průběhu roku 2015 měl za sebou projekt EAGLE kolem třinácti simulací,<sup>88</sup> které ukázaly, jak lze dynamicky explorativně kooperovat s parametrizacemi modelu. Tak například některé ze simulací, jejichž parametry nebyly vhodně zvoleny, nevedly k tomu, že se začaly v simulovaném vesmíru utvářet galaxie. V jinak parametrizovaných simulacích se naopak vytváří příliš mnoho tzv. trpasličích galaxií a je třeba hledat způsoby jak zahrnout zpětnou vazbu

<sup>87</sup> Viz SCHAYE *et al.* „The EAGLE project,“ s. 6; VOGELSBERGER *et al.* „Introducing the Illustris Project,“ s. 3.

<sup>88</sup> Simulace probíhají na nejvýkonnějších systémech počítačů a v průměru jedna vyžaduje několik měsíců.

a další podobná fyzikální působení do modelu. Nejúspěšnější simulace vedou i v tomto případě, podobně jako v simulaci ILLUSTRIS k překvapující shodě utvořených galaxií se skutečně pozorovanými galaxiemi v našem známém vesmíru. O přesvědčivosti a překvapivé úspěšnosti těchto simulací svědčí i např. komentář profesora Richarda Bowera z Univerzity v Durhamu: „Vesmír generovaný počítačem je jako reálná věc. Jsou zde všude galaxie, všech tvarů, velikostí a barev, jaké jsem pozoroval s největšími světovými teleskopy.“<sup>89</sup>

Neznamená to však, že by modely byly tak dokonalé, aby postihovaly veškeré fyzikální mechanismy na všech úrovních. V případě kosmologických simulací se předpokládá, že model odpovídajícím způsobem simuluje kosmologické procesy, i když nejsou přímo simulovány fyzikální procesy na těch škálách, které jsou příliš malé nebo příliš komplexní na to, aby byly fyzikálně přímo reprezentovány v modelu. Jejich vliv však nemůže být opomenut a je třeba ho do modelu nějakým způsobem zahrnout. V kosmologických modelech se to týká především detailního chování vícefázového mezihvězdného prostředí (*interstellar medium ISM*), které jako předmět energetické zpětné vazby zůstává špatně pochopeno.<sup>90</sup> Příslušná metodologie spočívá ve vhodné kalibraci parametrů procesů na nižších úrovních tak, aby simulace dobře reprodukovala pozorovatelné charakteristiky vesmíru. Autoři zároveň přiznávají, že „implementace a parametrizace těchto subúrovňových procesů je proto největším zdrojem nejistoty v kosmologických simulacích a nastavení těchto charakteristik má důsledky v dramatické změně výsledků simulace“.<sup>91</sup> Takovou kalibraci lze považovat za „Arakawův trik“ kosmologických simulací.

Z obecného hlediska lze simulace chápat jako „explorativní“ (objevovací) nástroj pro eliminaci všech parametrizovaných konfigurací, které nemají pozorovatelné důsledky. V těchto případech si můžeme být jisti, že by daná konfigurace zahrnutých kauzálních mechanismů a počátečních podmínek neměla pozorovatelné důsledky, jež pozorujeme v našem vesmíru. Ve všech ostatních a úspěšných případech se vymezuje (pravděpodobně) úzká oblast takových konfigurací, které k pozorovatelným důsledkům vedou, což však

<sup>89</sup> Viz „Scientists Have Only Gone and Created an Entire Universe!“ *Irish Examiner* [online]. 31. 12. 2014. Dostupné z: <<http://www.irishexaminer.com/examviral/science-world/scientists-have-only-gone-and-created-an-entire-universe-304669.html>> [cit. 22. 7. 2015].

<sup>90</sup> Robert A. CRAIN *et al.* „Galaxies-intergalactic Medium Interaction Calculation: I. Galaxy Formation as a Function of Large-Scale Environment.“ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, sv. 399, 2009, č. 4, s. 1774 (1773–1794).

<sup>91</sup> *Ibid.*



neznamená ověření úplnosti a správnosti kauzálních mechanismů zahrnutých v modelu ani ověření jejich parametrizace. V duchu popperovské falsifikace zůstávají takové modely jako domněnky zatím nefalsifikovány a má smysl se jimi dále zabývat tak dlouho, dokud nebudou nahrazeny lepšími modely. V souvislosti s diskutovanými kosmologickými modely se ve většině obdobných studií ukazuje, že simulace populací galaxií je nejcitlivější právě na nastavení subškálových parametrů, které řídí efektivitu energetické zpětné vazby.<sup>92</sup> Jinými slovy, jako rozhodující pro úspěšnost simulací se ukazují být právě ty procesy, jejichž pochopení je zatím neúplné či nejasné a v nichž je jejich parametrizace vedena čistě snahou o dosažení požadovaných pozorovatelných důsledků, tedy např. pozorovatelného rozložení galaxií, jejich rozmanitosti a tvarů atd. Tyto procesy nejsou ve zmiňovaných modelech přímo simulovány, protože fyzikální mechanismy probíhají na škálách podstatně menších než parsek, což je o tři řády méně, než je typická velikost rozlišení elementů v simulacích rozlehlých kosmologických oblastí.<sup>93</sup> Na druhé straně není subškálová fyzika rozhodující pro některé jiné důležité části problému utváření kosmologických struktur. „Poněvadž hydrodynamické simulace pracují s vývojem komponent temné hmoty a baryonické hmoty konzistentně, automaticky zahrnují zpětné reakce baryonů na bezkolizní hmotu uvnitř i mimo hala temné hmoty.“<sup>94</sup> V některých případech tedy modely nejsou zatíženy subškálovými předpoklady a daří se jim věrně simulovat příklady zahrnující pozorování a chování galaxií v rámci modelu chladné temné hmoty CDM. V jiných případech však nelze chápat shodu výsledků simulace s empirickými pozorováními jako „predikce“ modelu, protože jich bylo dosaženo díky kalibraci subškálových parametrů pro zpětnou vazbu.<sup>95</sup>

Je v takové situaci vůbec rozumné nějak metodologicky pochybovat o „správnosti“ takového modelu, má-li tak silnou teoretickou, empirickou i simulační podporu? Bezpochyby ano, a to nehledě na skutečnost, že se zatím nepodařilo dvě zmiňované základní temné komponenty – temnou hmotu a energii – propojit se současným fyzikálním rámcem. Podstata těchto komponent není stále známa, a tak všechny teoretické modely i simulace pracují s něčím, co se pouze gravitačně projevuje (přitažlivě či odpudivě), aniž by mohly své představy ukotvit v alespoň částečně otestovaných fyzikálních

<sup>92</sup> *Ibid.*, s. 1776.

<sup>93</sup> *Ibid.*, s. 1775.

<sup>94</sup> SCHAYE *et al.* „The EAGLE Project,“ s. 2.

<sup>95</sup> *Ibid.*, s. 16.

mechanismech. Podobně jako v případě objevu Higgsova bosonu musíme i zde uvažovat o epistemologickém kreditu pro ontologické tvrzení o existenci těchto temných komponent vesmíru. Do jaké míry mohou úspěšné simulace svědčit o jejich existenci?

Můžeme si v této souvislosti položit otázku, jaké výsledky by přinesly simulace, které by nebyly založeny na hypotetických temných komponentách (hmotě a energii), ale které by pracovaly s modifikovanou gravitační silou na velkých kosmologických vzdálenostech. Lze vyslovit předpoklad, že pokud by bylo možné vysvětlit některé gravitační chování hvězd v galaxiích nebo galaxií v clusterech hypotézou modifikované gravitace, např. MOND<sup>96</sup> nebo zmiňované relativistické TeVeS,<sup>97</sup> pak by výsledky simulací, které nejsou založeny na temných komponentách, ale na modifikované gravitaci, měly být co do pozorovatelných jevů neodlišitelné. Simulace založené na hypotéze modifikované gravitace nejsou vzhledem k mainstreamovému  $\Lambda$ CDM modelu ani tak početné, ani tak podrobné (tj. nejsou provedeny ve srovnatelných škálách a s odpovídajícími výpočetními nároky). Nicméně první pokusy o takové simulace prokázaly,<sup>98</sup> že struktury nalezené v určitém typu MOND modelu vesmíru nejsou podstatně odlišné od standardního  $\Lambda$ CDM modelu. Podstatné však je, že se podařilo stanovit některé možné pozorovatelné odlišnosti, které by mohly jednoduše rozhodnout o přijetí či odmítnutí MOND modelu. Je tu však zároveň výhrada, že simulovaný model obsahuje mnoho dodatečných předpokladů a je třeba ho chápat jako předběžný.<sup>99</sup>

## Závěr

Diskutované příklady simulací tak potvrzují většinu výše uvažovaných myšlenek. Viděli jsme, že Winsberg zmiňoval v 90. letech dvacátého století

<sup>96</sup> Mordehai MILGROM, „Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis.“ *The Astrophysical Journal*, sv. 270, 1983, s. 365–370.

<sup>97</sup> Jacob D. BEKENSTEIN, „Modified Gravity vs Dark Matter: Relativistic Theory for MOND.“ *Proceedings of Science*, roč. 2005, „JHW2004 012“, s. 012/1–012/18; Jacob D. BEKENSTEIN, „Tensor-Vector-Scalar Modified Gravity: From Small Scale to Cosmology.“ *Phil. Trans. R. Soc. A*, roč. 2011, č. 369, s. 5003–5017.

<sup>98</sup> Alexander KNEBE – Brad K. GIBSON „Galactic Halos in MONDian Cosmological Simulations.“ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, sv. 347, 2004, č. 4, s. 1055–1064; Alexander KNEBE „Mondian Cosmological Simulations.“ In: Mamon, G. – Combes, F. – Deffayet, C. – Fort, B. (eds.), *Mass Profiles and Shapes of Cosmological Structures*. Paris: EAS Publications Series 2005.

<sup>99</sup> KNEBE – GIBSON „Galactic Halos,“ s. 1063.

tři možnosti jak chápat simulace (viz s. 2). Diskutované příklady přesvědčivě ukazují, že simulace nejsou jen numerická řešení analyticky neřešitelných rovnic s využitím brutální-síly výpočetních prostředků. Pokud jde ale o další dvě možnosti, pak se nyní zdá, že nejsou výlučné a lze je docela dobře integrovat do jedné perspektivy. Simulace a numerické experimenty lze tak chápat jako reálné zástupce „simulakra“ systémů skutečného světa a díky tomu s nimi lze experimentovat jako s libovolnými jinými experimentálními objekty a zároveň, protože nejsou v tradiční dichotomii ani čistě experimentální ani čistě teoretické, jsou jakýmsi ‚třetím modelem‘ vědy, který je třeba nějak reflektovat.

Simulace jsou specifickými explorativními nástroji výzkumu, které mají svou vlastní tradici, vývoj a specifické postavení v kontextu vědy a jako takové vyžadují vyhraněnou filosofickou reflexi a epistemologicko-metodologické zhodnocení jejich role a statusu v kontextu současného bádání. Simulace a masivní využití digitálních technologií ještě mnohem intenzivněji než modely a modelování v 80. letech dvacátého století, velice silně poukazují k tomu, že mnoho tradičních dichotomií ztrácí svou deskriptivní sílu a není aplikovatelných v konkrétních studovaných případech v metodologii vědy. Taková situace vede k promyšlení těchto kdysi rigidních konceptů a otevírá nový prostor k reflexi instrumentů a jejich role ve vědeckém bádání.<sup>100</sup>

<sup>100</sup> Viz v našem kontextu např. kniha: Ladislav KVASZ, *Inštrumentálny realizmus*. Plzeň – Praha: Pavel Mervart 2015.