

**Slobodan Perović i Aleksandra Zorić**

*INDUKCIJA I UPOTREBA KOMPJUTERSKIH SIMULACIJA U NAUCI<sup>1</sup>*

*APSTRAKT: Induktivne procedure su analizirane u filozofiji nauke uglavnom u vezi indukcije naučnih teorija na osnovu eksperimentalnih rezultata. U poslednjih par decenija u mnogim oblastima kompjuterske simulacije igraju istu ili dominantniju ulogu u odnosu na eksperimente. Modeli prirodnih fenomena se testiraju ili indukuju na osnovu rezultata simulacija, i tako obavljaju ulogu koju su dominantno u prošlosti obavljali eksperimenti. Postavlja se pitanje da li je i u kojoj meri tradicionalno filozofsko razumevanje induktivnog procesa, razvijeno u analizi odnosa eksperimenata i teorija, adekvatno primenljivo na razumevanje modela i simulacija. Takođe, dva tradicionalno formulisana pitanja koja proizilaze iz te dileme jesu da li postoji subdeterminacija modela rezultatima simulacija, analogna onoj u tradicionalnim eksperimentalnim istraživanjima, koja je bila predmet višedecenijske debate u filozofiji nauke, i da li su simulacije opterećene teorijom i na koji način.*

*KLJUČNE REČI: indukcija, eksperiment, simulacija, naučni modeli, subdeterminacija*

## **1. Tradicionalno shvatanje indukcije i eksperimenta**

Premda prilično raznorodna, tradicionalna gledišta u filozofiji nauke imaju brojne sličnosti kada je reč o tumačenju nastanka naučnih teorija i cilja naučne aktivnosti. Preovlađujuće uverenje među filozofima nauke u 19. i u većem delu 20. veka bilo je da do naučnih teorija dolazimo induktivnim i eksperimentalnim putem, a njihova smena se posmatra kao postepeno (kumulativno) napredovanje ka sve adekvatnijem opisu proučavanih fenomena. Indukcija se prevashodno vezuje za kontekst otkrića. Filozofi kao što su Bekon, Mil, kao i dobar deo tradicije logičkih pozitivista, smatrali su da se nastanak hipoteza i teorija može uspešno objasniti kao postupak induktivnog uopštavanja polazeći od empirijskog svedočanstva (empirijskih ili opservacionih iskaza). Induktivno zaključivanje ima unutar ovakve tradicije i značajnu ulogu

---

1 Ovaj rad je predstavljen na 18. filozofskoj školi *Felix Romuliana*, održanoj od 31.08 do 3.9. 2017. godine u Zaječaru i nastao je u okviru projekta *Dinamički sistemi u prirodi i društvu: filozofski i empirijski aspekti* (#179041), pod pokroviteljstvom Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

u proceni potkrepljenosti hipoteze, onoj vrsti procene koja dolazi nakon njene prov-  
ere i kojom želimo da utvrdimo u kojoj je meri, imajući u vidu rezultate prov-  
ere, plauzibilnija od svojih rivala. Krajnje pojednostavljeno posmatrano, polazeći od em-  
pirijskih podataka induktivnim putem stvaramo hipoteze koje ih objašnjavaju. Takve  
hipoteze se zatim testiraju i eksperimentalno proveravaju.

Iako se čini da eksperimentisanje jasno pripada kontekstu opravdanja predloženih  
rešenja problema, isticana je i njegova uloga u kontekstu otkrića. Prilikom eksperimen-  
ta eksperimentator može proizvoljno baratati pojedinim odlikama neke situacije  
(tzv. promenljive, faktori) za koje pretpostavlja da su relevantne za nastanak pojave  
koju ispituje, tako da stalnim menjanjem nekih od njih, dok su ostale konstantne,  
posmatrač može uočiti efekte takvih promena na pojavu koju analizira, kao i stalne  
odnose zavisnosti između te pojave i relevantnih promenljivih.<sup>2</sup> Ovako shvaćen kon-  
trolisani eksperiment podrazumeva ne samo neposredne manipulacije promenljivih,  
već i reprodukciju efekata koje takve promene proizvode na pojavu koju proučavamo.  
Eksperimentisanje u tom smislu možemo shvatiti kao metod utvrđivanja uzročnih veza  
kontrolisanom manipulacijom promenljivih. Kako eksperimentom dolazimo do ad-  
ekvatnih naučnih teorija, on služi i kao metod otkrića, tj. način da od iskustvenih  
podataka dođemo do teorija koje ih objašnjavaju.

Pored brojnih problema koji još od Hjuma prate svaku raspravu o indukciji, jedan  
od ključnih argumenata protiv realistički obojenih prikaza naučne aktivnosti kojim se  
direktno ugrožava ideja o istinitom opisu stvarnosti, jeste problem subdeterminacije.  
U najprostijem i ne previše jakom obliku, tezom o subdeterminaciji tvrdi se da je na  
osnovu empirijskog svedočanstva moguće formulisati alternativne teorije koje bi bile  
jednako potvrđene takvim svedočanstvom, a postulirale različite entitete, procese,  
zakone kojima se objašnjavaju uočene pravilnosti. U nešto jačim oblicima, može se  
tvrditi da takve alternative uvek postoje, da ni buduće svedočanstvo neće moći da nam  
pomogne da odlučimo koja je od alternativnih teorija ispravna, ili, u najjačem smislu,  
da je nauka u principu subdeterminisana. Jasno je da subdeterminacija čak i u naj-  
labijoj formi, kao načelna mogućnost, predstavlja problem za realističku sliku nauke  
prema kojoj su naučne teorije istiniti opisi stvarnosti, a postulirani entiteti postojeći.  
Naime, ukoliko je na osnovu svedočanstva moguće formulisati alternativne, jednako  
potvrđene teorije, postavlja se pitanje kako možemo tvrditi da je jedna od njih istinita  
i da predstavlja pravi opis stvarnosti, te da su upravo entiteti i zakoni koje ona postu-  
lira stvarno postojeći a ne samo teorijski konstrukti.<sup>3</sup>

Kada se govori o tradicionalnom shvatanju odnosa indukcije i eksperimenta, tradi-  
cionalno stanovište i pogodne ilustracije su razvili Mil i Njutn. Za tu svrhu biće nam

---

2 Vidi: Nejgel, E. (1974), str. 400-401.

3 Najopštiji prikaz različitih tvrdjenja za koja se smatra da izražavaju tezu subdeterminacije kao  
i neki od mnogobrojnih odgovora, mogu se naći u zborniku Harding, S. (1976).

od koristi Njutnova istraživanja u optici i Milovo shvatanje kanona eksperimentalnog istraživanja. Milovi kanoni su za svrhe ovog rada naročiti pogodni, budući da je Mil smatrao da oni izražavaju suštinu eksperimentalnog metoda, a pritom su ujedno i induktivni. Otuda bi njihova analiza mogla da da skicu tradicionalnog tumačenja indukcije i eksperimenta i njihove funkcije u procesu stvaranja teorija.

Mil indukciju određuje kao uopštavanje iz iskustva, odnosno zaključivanje koje polazi od pojedinačnih instanci u kojima se posmatrani fenomen javlja ka zaključku da se on javlja u svim slučajevima određene vrste, onim koji nalikuju posmatranim instancama.<sup>4</sup> U svakom induktivnom zaključivanju implicitno je prisutan princip uniformnosti prirode, princip da u prirodi postoje paralelni slučajevi, da će budućnost ličiti na prošlost, da će ono što nismo imali u iskustvu nalikovati onome što smo iskusili. To je osnovni aksiom indukcije i ujedno nedostajuća velika premisa induktivnog zaključivanja koja bi trebalo da mu obezbedi valjanost.<sup>5</sup> Pa ipak, prirodu ponekad doživljavamo kao uniformu i očekujemo da će uočene pravilnosti važiti u budućnosti, a ponekad ne verujemo da postoji velika verovatnoća da će to biti slučaj. Priroda osim uniformnosti pokazuje i visok stepen neuniformnosti. Do principa uniformnost prirode dolazimo stalnim otkrićima posebnih pravilnosti, tzv. zakona prirode.<sup>6</sup> Zakoni prirode izražavaju uzročne povezanosti, za razliku od onih generalizacija kod kojih ne vidimo uzročno-posledičnu vezu između svojstava koje povezujemo.<sup>7</sup> Zbog toga Mil smatra da brojne iskustvene generalizacije do kojih dolazimo induktivnim putem ne tumačimo kao zakone prirode i nismo skloni da im pripišemo nužno važenje.

Prvi i osnovi metod za utvrđivanje uzročnih povezanosti i dolaženje do zakona prirode, Mil naziva kanonom slaganja.<sup>8</sup> „Ako dva ili više slučajeva posmatrane pojave imaju samo jednu zajedničku okolnost, okolnost koja im je svima zajednička je uzrok ili posledica posmatrane pojave.”<sup>9</sup> Drugi metod je daleko plodniji u proučavanju prirode i njega Mil naziva kanonom razlike.” Ako slučaj u kome se ispitivana pojava javlja i onaj u kome se ne javlja, imaju sve okolnosti zajedničke osim jedne, one koja

4 Mill, J. S. (1974), p. 306.

5 Reč je o najstandardnijem pokušaju opravdanja indukcije sa ciljem da u induktivnom zaključivanju dođemo do izvesnosti koja nedostaje. Pozivanjem na princip uniformnosti dajemo legitimnost posebnim tvrdnjama o pravilnostima do kojih smo došli induktivnim putem.

6 Mill, J. S. (1974), p. 315.

7 To bi moglo da objasni činjenicu da ne smatramo zakonom prirode generalizacije oblika „Sve vrane su crne” ili „Svi labudovi su beli”. Osim što uvek postoji mogućnost postojanja bele vrane, kao i stvarno postojanje crnog labuda, ne vidi se da postoji uzročno -posledična veza između boje perja i posebne vrste ptica.

8 Mil ukupno navodi pet različitih kanona. Osim pomenutih tu su još i kombinovani metod slaganja i razlike, metod ostatka i metod zajedničke promene. Za svrhe ovog rada, dovoljna su prva dva kanona,

9 Mill, J. S. (1974), p. 390.

se javlja u prvom slučaju, okolnost u kojima se ova dva slučaja razlikuju je posledica, ili uzrok ili neophodni deo uzroka pojave.<sup>10</sup>

I jedan i drugi metod su metodi eliminacije, koji umnogome podsećaju na ono što Bekon zove eliminativnom indukcijom. Bekon je smatrao da indukcija mora da pruži opštu shemu karakteristika koje podaci moraju posedovati kako bi služili kao osnov za generalizacije. Ne možemo utvrditi istinitost induktivnih generalizacija samo prikupljanjem onih slučajeva koji joj idu u prilog, jer time nikada ne isključujemo mogućnost javljanja kontraprimera. Zbog toga je neophodno napustiti indukciju nabranjanjem i prednost dati indukciji eliminacijom. Indukcija je shvaćena kao postupak eliminacije takmičarskih hipoteza.

Vratimo se Milovom metodu razlike. Eksperimentator uvodi neki novi faktor A i kao rezultat vidi neku posledicu B, koja se nije javljala pre nego što smo uveli novi faktor. On je otuda jedina relevantna razlika koju uočavamo. Ukoliko nije ispustio nijedan relevantan faktor u svojoj analizi naučnik može da zaključi da A uzrokuje B, te da su slučajevi A praćeni slučajevima B.

Veliki broj eksperimenata u nauci zaista počiva na metodu razlike (bilo sa pozitivnim bilo sa negativnim rezultatom). Svi Galilejevi eksperimenti slobodnog pada koriste ovaj metod: on kontroliše i varira težinu a zatim materijal kako bi pokazao da ova svojstva ne utiču na pad, a zatim varira visinu kako bi došao do njenog odnosa sa vremenom pada.<sup>11</sup> Njutn je koristio isti metod u proučavanju boja u svojim predavanjima iz optike.<sup>12</sup> Tokom tog perioda je istraživao pojavu prelamanja svetlosti, pokazavši da se uz pomoć trostrane prizme bela svetlost može razložiti u spektar različitih boja, a da uz pomoć sočiva i druge prizme, ovaj spektar ponovo možemo složiti u zrak bele svetlosti. U Njutnovo vreme vladalo je uverenje da su boje proizvod refleksije uobičajene svetlosti čija boja će zavisi od prirode tela. Međutim, u drugoj polovini 17. veka bilo je poznato i to da se boje mogu dobiti i refrakcijom (prelamanjem usled promene pravca kretanja svetlosti usled promene brzine svetlosti). Njutn svoja prva istraživanja sprovodi na prizmi. Najpre posmatra različite objekte kroz prizmu i uočava boje koje se pojavljuju na granicama svetlih i tamnih objekata. Tako na primer, ako posmatramo beli papir na crnoj površini kroz prizmu jedna ivica papira izgledaće crvena a druga plava. Plava i crvena boja su na suprotnim stranama spektra, pa Njutn sebi postavlja pitanje da li to što ih tako vidimo nije posledica njihovog položaja u snopu svetlosti, već toga da su iskrivljene različitim uglovima vode ili stakla?

Na ovo pitanje odgovor može jedino dati eksperiment. Nakon što je jednu polovinu vlakna obojio u plavo i drugu u crveno, posmatranjem kroz prizmu uočava da

10 Ibid., p. 391.

11 Više o metodu razlike u Galilejevom radu čitalac može da sazna iz Drake, S. (1978). Vidi posebno str. 327. te knjige. Osim toga, vidi još i Wisan, W. L. (1978), posebno str. 32.

12 Vidi Sepper, D. L. (1994).

su plavi i crveni delovi u diskontinuitetu tako što se jedan javlja iznad drugog, te da se plavi deo značajnije izmenio u odnosu na crveni. Iz toga Njutn izvodi zaključak da se prilikom prelamanja, plava svetlost savija pod oštrijim uglom nego crvena.

Izvedeci serije eksperimenata sa prizmom, Njutn dolazi do zanimljivog zapažanja: možda boje nisu rezultat procesa u samoj prizmi, već se u njoj već prisutne boje u beloju svetlosti samo razdvajaju na osnovu promenljivog ugla prelamanja. I možda se mešavina svih boja u iskustvu javlja kao bela svetlost? Ako se bela svetlost sastoji od svih boja, onda je moguće doći do svih pojedinačnih boja iz bele svetlosti putem eksperimenta. Takav eksperiment izvodi uz pomoć prizmi i sočiva i uočava da kada ceo spektar konvergira on izgleda beo. Međutim, kada spektar prolazi kroz žižnu tačku i divergira ka suprotnoj strani, boje se pojavljuju u obrnutom redosledu. Posebne boje su čiste i jednostavne komponente, dok je bela boja njihova mešavina. Njutn je ovakvim postupkom demonstrirao da boje ne nastaju modifikacijom bele svetlosti već da su osnovne komponente bele svetlosti.<sup>13</sup> Odnosno "eksperimenti su mu pokazali da obojena svetlost nije modifikovana forma bele svetlosti".<sup>14</sup>

Njutn dokazuje i to da kada se jedan zrak obojene svetlosti izdvoji iz ovog spektra dalje ne menja svoja svojstva čak i kada se propušta kroz različita druga providna tela. Njutn zapaža da bez obzira na to da li je obojeni zrak reflektovan, rasut ili propušten kroz neki predmet, njegova boja ostaje neizmenjena. Iz toga izvodi zaključak da su boje koje opažamo rezultat interakcije od već ranije obojene svetlosti sa telima, ne rezultat toga kako tela proizvode svetlost.

Kada je reč o prvom Milovom kanonu i njegova uloga u eksperimentu je više nego očigledna. U ovom slučaju tragamo za sličnim faktorom koji se javlja u onim slučajevima koji vode sličnim posledicama. Korišćenjem ovog metoda uočavamo da se dva ili više slučajaja neke posledice B slažu u tome što imaju samo jedan relevantan

13 Newton, I. (1704), pp. 101, 107-108.

14 Vidi: Hall, A. R. (1995), p.11. („[H]is own experiments taught him that coloured light is not a modified form of white light. . . Particularly Newton was to insist on the atomicity (as we may call it) of the rays of light, a notion incompatible with any kind of aetherical motion. It seemed to Newton that the rectilinearity of light required it to be a radiation of matter, not of pressure or vibratory motion; a streaming out of projectile-like particles. Just as atoms combine into bodies, so these particles combine into a beam of light; and as atoms retain their identity no matter what compounds they form, so these particles retain theirs though they seem to be lost in the heterogeneous mixture which is white light. For (Newton came to believe) we chiefly recognize the identity of the light-particles as colour (itself of course, a product of our physiological system). A homogeneous coloured beam is a stream of identical particles, though in what original property their identity lay Newton could never positively determine. When we mix two such beams of different colours, say red and blue, two streams of identical particles, each differing from those of the other stream, combine to form a new impression upon the eye, in this case purple. On the basis of this theory of the atomicity of the light-particles, groups of which can be combined or separated without the identity of a single particle ever being altered, Newton was able to account for the ordinary colours of objects seen in white light as well as the spectral colours, a feat beyond Descartes.”)

polazni faktor A. A onda možemo tumačiti kao uzrok B, dok su ostali eliminisani zbog toga što se posledica javlja i onda kada su oni odsutni. Ako smo pojmove formirali na pravi način, možemo doći do univerzalne istine: Slučajevi A vode do slučajeva B.

Tako su mnogi faktori bili drugačiji u opservacijama koje su uključivale belu svetlost koja je u interakciji sa prizmama, sočivima, kišnim kapima itd.. Iz slučaja u slučaj, jedan faktor je ostajao konstantan: to da je svetlost bela; i jedan aspekt ishoda je takođe konstantan: bela svetlost se rastvarala u boje. Putem metoda slaganja, Njutn dolazi do zaključka da je bela svetlost mešavina elementarnih boja koje se mogu izdvojiti putem prelamanja ili refleksije.

Na osnovu ovakve analize čini se da Njutn zaključke izvodi iz opaženih rezultata eksperimenta, ne iz intuicije ili neke druge moći duha nepodložne daljoj analizi. U tom smislu možemo i tumačiti njegov čuveni slogan „ne izmišljam hipoteze” – on je sam branio induktivističko stanovište. Hipoteza je iskaz koji je izveden ili dat na osnovu fenomena, pretpostavljen na osnovu eksperimentalnog svedočanstva. Hipoteze nisu slobodne kreacije duha, jer nas pravilo da hipoteze možemo slobodno stvarati nikada neće dovesti do nečega izvesnog u nauci. Da bismo shvatili svet koji nas okružuje jedini ispravan put je da počnemo od čulnog iskustva. Sve arbitrarne ideje su izvan takvog iskustva i nikada ih u pravom smislu ne možemo dokazati.

Kako dolazimo do prihvatljivih generalizacija? Jedan od načina na koji bismo ovo mogli da objasnimo a da ostanemo verni empirističkoj tradiciji, jeste da insistiramo na tome da su naše prve generalizacije zasnovane na direktno opaženim uzročnim povezanostima. U tom smislu bi prvi korak ka razumevanju gravitacije bile generalizacije oblika „Teške stvari padaju”. Dete shvata pojam težine tako što u rukama drži različite objekte i oseća različit pritisak koji na njega vrše. Ono uočava da neki objekti vrše jači pritisak a neki slabiji, na osnovu ovakvog merenja dolazi do svojstva „težine”. Pojam pada takođe možemo izvesti iz iskustva: reč je o kretanju naniže objekata koje ispuštamo. Dete može da uoči vezu između ova dva pojma; težina kamena uzrokuje da on padne kada ga ispustim. Za ovakve generalizacije nije neophodna primena nekog posebnog metoda. Moglo bi se reći da su nam i pojmovi i uzročna veza dati u samom iskustvu.

Postupak generalizacije počiva na uočavanju sličnosti i razlika. Važno je imati na umu ono što je i sam Njutn zahtevao, svedočanstvo (zasnovano na opservaciji) mora postojati da bismo uopšte predložili neki faktor kao mogući uzrok. U nedostatku takvog svedočanstva, nećemo prihvatiti nijedan zaključak o uzrocima. Najčešća kritika Milovih kanona ukazuje na činjenicu da oni počivaju na prethodnim hipotezama o tome koji se faktori mogu smatrati relevantnim a koji su, samim tim, irelevantni za nastanak pojave koju ispitujuemo. Odnosno, potrebne su nam preliminarne hipoteze. Iako ove hipoteze neće imati empirijsku podršku onda kada su formulisane, možemo reći da im kanoni pružaju eksperimentalnu podršku. Na osnovu podrške koju pružaju eksperimentalne provere, dolazimo do plauzibilnih empirijskih generalizacija.

U tom smislu pitanje koje je Njutna dovelo do prvog velikog otkrića u optici, „Da li se plava svetlost više prelama od crvene?“, nije moguće ni postaviti bez pojma prelamanja. Sam pojam prelamanja je spoj svih slučajeva savijanja svetlosti u susretu sa dva materijala. Takva radnja zavisi samo od prirode svetlosti i materijala, koji su takođe identifikovani u pojmovnom okviru. Jasno je da je reč o tome da moramo imati prethodne pretpostavke, hipoteze, o tome šta je relevantno a šta nije, te šta će biti predmet našeg istraživanja.<sup>15</sup>

Čini se da na pitanje odnosa indukcije i eksperimenta u tradicionalnoj filozofiji možemo dati različite odgovore. Svako eksperimentisanje pretpostavlja neke preliminarne hipoteze o predmetu proučavanja, a rezultati eksperimenata omogućavaju nam da formulišemo generalizacije o uzročnim povezanostima među posmatranim fenomenima. Čini se da se ova dva metoda u velikoj meri prepliću kada je reč o onome što tradicionalno pripada logici otkrića. Kakva je priroda ovih preliminarnih hipoteza i da li su one proizvod induktivnog zaključivanja, jeste pitanje koje je zaokupilo pažnju brojnih teoretičara.

Iako indukcija i eksperiment možda nisu metode kojima dolazimo do naučnih teorija, budući da su za njihovu primenu neophodne prethodne pretpostavke koje često nisu direktna posledica prethodnih znanja, čini se da je njihova uloga u naučnom istraživanju neosporna. Rezultati eksperimenata nam često pružaju osnov za induktivne zaključke o uzročnim povezanostima, pri čemu i dalje ostaje na snazi tradicionalna ideja da možemo govoriti o određenom stepenu podrške, odnosno, verovatnoće hipoteze na osnovu svedočanstva. Kako na temelju takvog svedočanstva uvek možemo formulisati inkompatibilne teorije koje će biti jednako dobro potvrđene, jasno je da takvo svedočanstvo neće jednoznačno određivati koju od teorija treba da prihvatimo. Tradicionalni problem subdeterminacije možemo pokušati da otklonimo time što ćemo uvesti induktivističke kriterijume izbora (eksplanatorna snaga, stepen potkrepljenost), što nas ponovo vraća na tradicionalne probleme uloge i opravdanosti induktivnog zaključivanja i otvara prostor za novu interpretaciju odnosa svedočanstva i teorije.

---

15 Iako ispravna pojmovna shema ne garantuje istinitost generalizacija do kojih dolazimo, greške koje naučnici čine često se mogu obrazložiti neadekvatnošću pojmovne sheme. Kada naučnici vrše preširoke generalizacije (tj. zaključke koji se protežu preko onoga što bi bio legitimni opseg njihovog važenja) često to čine usled toga što im nedostaju pojmovi kako bi označili važne razlike. Pojmovi mogu dati zeleno svetlo za indukciju samo ako su precizno definisani, a ta preciznost je u fizici često matematička. Galilej je morao da definiše brzinu i ubrzanje u matematičkim terminima kako bi mogao da formuliše teoriju kretanja. Tako je i Njutn napravio pomak u optici kada je iz kvalitativnog prešao na kvantitativni nivo. Progres je moguć samo kada su zakoni formulisani u kvantitativnim terminima.

## **2. Epistemološki okvir upotrebe kompjuterskih simulacija u nauci**

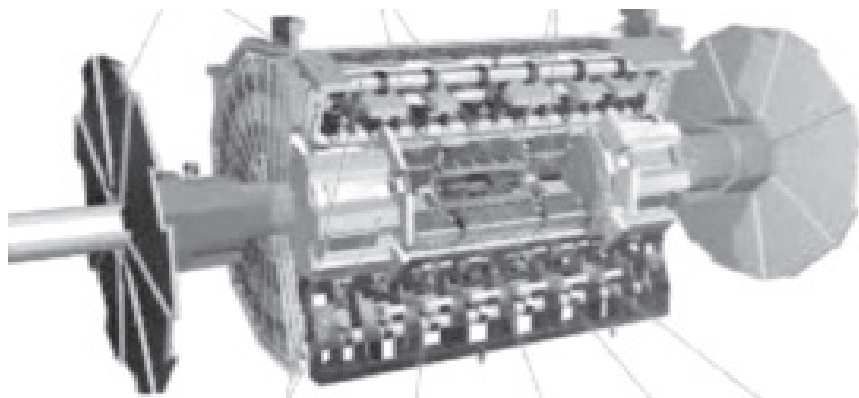
Ovo su poente koje se odnose na epistemološke dileme tradicionalne forme naučnog saznanja; na koji način rezultati eksperimenta potkrepljuju teoriju i na koji način se iz rezultata indukuje naučno saznanje. Logički pozitivisti, čija su stanovišta osnov savremene filozofije nauke, bili su primarno zainteresovani za to šta čini osnovnu matematičko-logičku strukturu teorija i logičku vezu sa posmatranjima i rezultatima eksperimenata. U velikoj meri epistemologija samog eksperimenta i toga kako se tačno prikuplja evidencija i na koji se način iskustvo generiše ne bi li se teorija potvrdila ili opovrgla je bilo dugo zanemareno. Tek početkom 1980ih godina su filozofi nauke počeli sistematski da se bave ovim pitanjima.

Međutim, u međuvremenu su se pojavile kompjuterske simulacije kao sve prisutnije sredstvo u nauci, pri čemu nije jasno da li pripada teoretskoj, deduktivnoj, ili induktivnoj strani nauke, bližoj eksperimentu. O potencijalu kompjuterskih simulacija ilustrativno govore neki pojedinačni primeri. Na primer indijska misija na Mars, koja iako uspešna – što samo po sebi predstavlja veliki uspeh s obzirom da svega svaka treća misija na Mars doživi uspeh – daleko je najjeftinija od svih dosadašnjih baš zahvaljujući isključivom testiranju putem kompjuterskih simulacija. Prilikom testiranja nisu upotrebljavani nikakvi fizički modeli koji drastično poskupljuju izradu. Drugi je primer detektor na Velikom hadronskom sudaraču u CERN-u (Slika 1) koji beleži ostatke kolizije protona. Taj je kompleksni i masivni detektor takođe napravljen tako što su na računaru simulirani rad delova i celine. Nakon nekoliko godina dizajniranja i testiranja tim putem izgradnja detektora je uspešno izvedena.

Zapravo, simulacije su u nauci prvi put upotrebljene baš u oblasti fizike čestica u akceleratorima koji su proizvodili visoke energije. U procesima sudara elementarnih čestica proizvodi se ogromna količina interakcija, i shodno tome ogromna količina informacija. Upotreba računara se pokazala neophodnom nakon što je broj interakcija dostigao određenu kritičnu tačku tokom razvoja sudarača čestica već početkom pedesetih godina prošlog veka. Ishodi računarske simulacije tih interakcija se upoređuju sa dobijenim podacima. Pri programiranju simulacije unose se ograničenja analogna ograničenjima koja postoje u samom fizičkom sistemu i na osnovu toga se izračunaju verovatnoće mogućih scenarija interakcija i njihovih ishoda. Nakon toga se ti rezultati porede sa podacima dobijenim u samim interakcijama proizvedenim u sudaraču. Korišćenje te tehnike je ubrzo postalo uobičajena i nezamenljiva vrsta eksperimentalne procedure.

Upotreba kompjuterskih simulacija u slične svrhe postala je standardna i u drugim oblastima fizike, kao i u drugim oblastima nauke, naročito gde se operiše sa velikom količinom podataka. Jedna od osnovnih vrsta takvih simulacija, tzv. Monte Karlo simulacija, kao ulazne veličine ima parametre koji se naizmenično randomiziraju i fiksiraju, pa se rezultati koriste u proceni podataka (npr. koju hipotezu od nekoliko alternativa najverovatnije potvrđuju) dobijenih posmatranjima ili eksperimentom.





**Slika 1:** Atlas detector Velikog hadronskog sudarača u CERN-u.

Šta su kompjuterske simulacije epistemološki gledano? Da li su neka vrsta egzotičnih teorijskih dedukcija, u suštini ista kategorija aktivnosti kojom se bavi recimo teorijski fizičar kada izvodi neke teorijske proračune matematičkim sredstvima? Da li računar u suštini radi isto to samo mnogo brže i sa kompleksnijim zadacima koje sam teoretičar ne bi mogao da reši u realnom vremenu? Ako je odgovor potvrđan onda su kompjuterske simulacije puko pomagalo teorijskom aspektu naučnog rada.

No, pre nego li razmotrimo tu mogućnost kao i alternativna stanovišta koja su znatno bliža shvatanju eksperimenta i indukcije koje smo izložili, zašto je to pitanje uopšte epistemološki interesantno? Pitanje je naravno relevantno baš u smislu određenja u okviru tradicionalnih kategorija indukcije i dedukcije u nauci. No, jedan konkretan primer koji pokazuje u kojoj meri ovo pitanje može biti relevantno ne samo u apstraktnom epistemološkom smislu jeste primer istraživanja fenomena globalnog zagrevanja. Procene u kojoj meri i na koji način se zagreva Zemljina atmosfera, i koje su tačno moguće posledice zagrevanja, zavise upravo od rezultata relevantnih kompjuterskih simulacija. Adekvatnost teorijskih modela se proverava simulacijama koje daju procene u vidu verovatnoća. Ključno je pitanje, dakle, u kojoj meri možemo imati poverenje u takve rezultate, zavisno od toga da li smatramo da su simulacije nešto poput eksperimenata, ili analog sofisticiranim teorijskim izvođenjima.

Takođe, često neke veličine važne za objašnjenje prirodnih fenomena koji nas zanimaju ne možemo da izmerimo iz praktičnih razloga. Recimo, ne možemo da direktno izmerimo temperature jezgra Sunca niti da posmatramo direktno procese u njemu, ali zato možemo da izvedemo detaljnu simulaciju procesa koja će nam dati odgovor na postavljena pitanja u tom slučaju pošavši od podataka indirektnih merenja i poznatih relevantnih fizičkih veličina i procesa. Kakvu vrstu podataka dobijamo u takvom slučaju: analognu teorijskim izvođenjima ili pre rezultatima eksperimenta i direktnih posmatranja?

Jedan od odgovora na pitanje šta su kompjuterske simulacije jeste da nisu ništa drugo do sofisticirana teorijska izvođenja.<sup>16</sup> To su kompleksne teorijske aproksimacije fizičkih sistema koje simuliraju. Možda ključni argument za takvo stanovište jeste da simulacije nikada ne rezultiraju iznenađujućim otkrićima, niti mogu u principu rezultirati, kao što je to slučaj sa eksperimentima. Zapravo neka od ključnih otkrića u nauci, naročito recimo u oblasti fizike čestica, su bila iznenađujuća otkrića fenomena koje nisu predvidele postojeće teorije. U simulacijama, na osnovu ovog argumenta, ulazni podaci i korišćeni modeli će nam uvek dati rezultate u očekivanom okviru modela.

Debata u vezi ovog argumenta je možda i ključna za odgovor na postavljeno pitanje. Nasuprot navedenoj poziciji je stav<sup>17</sup> da simulacije nisu isto što i teorijska izvođenja, nego da su znatno komplikovanije epistemološki gledano, i da zahtevaju razumevanje u okviru posebne epistemološke kategorije različite od eksperimentalne indukcije i od teorijskih dedukcija jer razumevanje teorije i eksperimenta ne nudi zadovoljavajući okvir za razumevanja prirode simulacija. Ovakav stav se brani načelno ali i detaljnim analizama pojedinačnih slučajeva simulacija, npr. simulacija uragana<sup>18</sup>. Drugim rečima, tradicionalni Hipotetičko-deduktivni model nauke po kojem se iz teorije izvodi hipoteza koja se zatim empirijski testira je neadekvatan u slučaju simulacija. Simulacije se ne mogu objasniti niti kao teorijske dedukcije na osnovu empirijskih zakona i činjenica, niti kao empirijski testovi i generatori opservacionih iskaza. Teorijska izvođenja su samo deo onog što čini simulacija jer često imamo *ad hoc* pretpostavke koje su empirijski opravdane, ili hibridne teorijsko-empirijske modele koji se simuliraju. Deduktivnim postupkom za kojim poseže tradicionalni teorijski fizičar tako nešto ne bi bilo izvodljivo.

Takođe, simulacije su u nekim oblastima postale deo objašnjenja i potvrde otkrića.<sup>19</sup> Teško je odvojiti same rezultate merenja od simulacija koje im daju teorijski smisao. Teško je u tim slučajevima i govoriti o onome što bi Bejkon nazvao „naked data”. Otkriće u sudaraču čestica se ne sastoji od golih podataka, električnih potencijala očitanih na računaru, već od takvih podataka plus rezultata relevantnih simulacija.

Treća vrsta odgovora na pitanje jeste da one zadovoljavaju sve epistemološke kriterijume koje zadovoljavaju i eksperimenti.<sup>20</sup> Drugim rečima, kada izvodimo simulaciju na računaru u vezi nekog fenomena, zapravo izvodimo *in silico* eksperiment. Ono što recimo inženjeri rade kada simuliraju let najnovijeg aviona zapravo je isto što bi radili kada bi u vazдушnom tunelu izvodili probe. Argument u prilog ovom stavu se sastoji u analizi sazajnog procesa u slučaju simulacija i eksperimenata i njihovog

---

16 Beisbart, C. and Norton, J. D. (2012).

17 Winsberg, E. (2003).

18 Ibid.

19 Morrison, M. (2009).

20 Parker, W.S. (2009).

poređenja. Time bi se utvrdilo u kojoj meri se svaki od kriterijuma koji karakteriše eksperimente može primeniti na simulacije.

Jedan od ključnih kriterijuma se odnosi na uzročno posledičnu vezu između fenomena koji se proučava i simulacije. Da li u tom slučaju postoji direktna veza kao u slučaju eksperimentisanja sa fenomenom? Na prvi pogled to tako ne izgleda, i simulacije se mogu učiniti posredovanim odnosom sa proučavanim fenomenom, u poređenju sa eksperimentima. Da li, međutim, silicijum i procesi koji se odvijaju u njemu prilikom izvođenja simulacija obezbeđuju indirektni kontakt sa svetom-fenomnom? Da li funkcija predstavljanja ima istu kauzalnu strukturu kao i u regularnom eksperimentu? Jedan odgovor na to je da ni u eksperimentima nemamo posla sa direktnom kauzalnom vezom. Kad proučavamo elementarne čestice putem njihovih interakcija u pitanju je takođe indirektno kauzalno zaključivanje. Detektovane vrednosti su uvek posledica nekih interakcija koje ne možemo opaziti direktno, već indirektnom manipulacijom indukujemo relevantne podatke. U simulacijama polazimo od rezultata posmatranja pa onda njima manipuliramo ne bi li smo opet došli do indirektnih kauzalnih zaključaka o proučavanom fenomenu. U tom smislu nema nekakve suštinske razlike između simulacija i eksperimenata, naročito ako su simulacije veoma detaljne. Ako verujemo da je usklađivanje teorije sa rezultatima uvek pitanje reprezentacije sistema (kao kod logičkih pozitivista), onda se eksperiment i simulacija ne razlikuju u smislu njihovog kapaciteta za generisanje znanja. Direktno merenje je uvek posredovano teorijom u svakom slučaju. Na primer, slanje drona u jezgro Sunca i simuliranje pod empirijskim ograničenjima su podjednako isposredovani u odnosu na nas kao konačnog saznanog subjekta. Na potpuno isti način indukujemo saznanje o fenomenu u oba slučaja, i ako važe, Milovi principi, važe u oba slučaja.

Kada se detaljnije uporede eksperimentalne strategije putem kojih se obezbeđuje validnost eksperimentalnih rezultata, ispostavlja se da se sve te strategije primenjuju i u slučaju simulacija.<sup>21</sup> Recimo, robusnost eksperimentalnih podataka pri varijacijama parametara, poput varijacija koje je već Mil okarakterisao u svojim metodama, a koja je argument u prilog validnosti rezultata, važi i u slučaju simulacija. V. Parker<sup>22</sup> primećuje da se primenjuju eksperimentalne strategije indentifikacije greške i u slučaju simulacija. Nailazimo zapravo na iste poteškoće kao u simuliranim merenjima. Da li je u pitanju 'maskiranje', mimikrija, ili pravi signal, su pitanja koja će se razrešavati na isti način i u slučaju eksperimenta i simulacije. U takvim slučajevima, takođe, možemo da otkrijemo nov neočekivan fenomen, suprotno tvrdnjama onih koji poistovećuju simulacije sa teorijskim izvođenjima.

Postoji takođe i četvrta vrsta odgovora, koja je zapravo nekakva pozicija između gore-navedenih stanovišta, a do sada nije dovoljno razvijena. Simulacije u nekom svedenom smislu jesu dedukcije, tj. teorijska izvođenja, ali kad su iskorišćene u nekom

---

21 Ibid.

22 Ibid.

konkretnom slučaju, tj. direktno povezane sa nekim istraživačkim kontekstom i podacima koji se u njemu generišu, ne možemo simulaciju da tretiramo i dalje u svedenom smislu, kao što ne možemo ni same rezultate da smisleno tretiramo nezavisno od simulacije. U pitanju je zapravo hibrid teorije, simulacija i eksperimenta.

Kao što smo videli, tradicionalna stanovišta u vezi indukcije u nauci, eksperimenta, i dedukcije su dobra i neophodna polazna osnova za razumevanje simulacija. Ali relevantnost jednog tradicionalnog filozofskog pitanja, naime pitanja subdeterminacije teorija evidencijom, nije do sada razmotreno u kontekstu epistemološkog razumevanja simulacija. Ako su simulacije poput eksperimenata u metodološkom smislu, onda su otvoreni primedbama i uvidima o subdeterminaciji i čitavoj paleti stanovišta u vez tog problema. Takođe je otvoreno pitanje u kojoj meri teorija opterećuje evidenciju u slučaju simulacija, i kakve mogu da budu epistemološke konsekvence takvog odgovora.

Slobodan Perović i Aleksandra Zorić  
Univerzitet u Beogradu, Filozofski fakultet

## Literatura

- Beisbart, C. and Norton, J. D. (2012), „Why Monte Carlo simulations are inferences and not experiments”. *International studies in the philosophy of science*, 26(4), pp. 403-422.
- Drake, S. (1978), *Galileo at Work: His Scientific Biography*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Hall, A. R. (1995), *All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks*, Oxford University Press, New York.
- Harding, S. (1976), ed., *Can Theories be Refuted: Essays on the Duhem-Quine Thesis*, Dordrecht Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Mill, J. S. (1974), *A System of Logic: Ratiocinative and Inductive*, University of Toronto Press, Routledge & Kegan Paul.
- Morrison, M. (2009), „Models, measurement and computer simulation: the changing face of experimentation”, *Philosophical Studies*, 143(1), pp. 33-57.
- Nejgel, E. (1974), *Struktura nauke: Problemi logike naučnog objašnjenja*, Nolit, Beograd.
- Newton, I. (1704), *Opticks: Or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours*, London.
- Parker, W.S. (2009), „Does matter really matter? Computer simulations, experiments, and materiality”, *Synthese*, 169(3), pp. 483-496.
- Sepper, D. L. (1994), *Newton's Optical Writings: A Guided Study*, Rutgers University Press, New Brunswick.
- Winsberg, E. (2003), „Simulated experiments: Methodology for a virtual world”, *Philosophy of science*, 70(1), pp. 105-125.
- Wisn, W. L. (1978), „Galileo's Scientific Method: A Reexamination”, in: *New Perspectives on Galileo*, ed. by Butts, R. E. and Pitt, J. C., Dordrecht Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Slobodan Perović i Aleksandra Zorić

Slobodan Perović i Aleksandra Zorić

**Induction and the Use of Computer Simulations in the Science**  
(Summary)

In philosophy of science, inductive procedures have been predominantly analysed with respect to the induction of scientific theories based on the experimental and observational results. Over the last few decades computer simulations play as important, or even more dominant role compared to the experiments across scientific fields. Models of natural phenomena are tested and hypotheses induced based on the results of adequate simulations. They have gradually acquired importance in the scientific process traditionally reserved for experiments. We ask whether and to what extent philosophical understanding of the inductive process, as it has been traditionally developed through the analysis of scientific experiments and theories, can be properly applied to understanding such simulations. Another two classic questions posed by that dilemma are whether there is an underdetermination of simulated models by the results of simulations analogous to the one in traditional experimental research which was the subject of debate in the philosophy of science that lasted for decades, and whether simulations are theory laden.

KEYWORDS: induction, experiment, simulation, scientific models, underdetermination.