

# KVANTNA REVOLUCIJA

otkriće subatomskeg sveta

Slobodan Perović



# KVANTNA REVOLUCIJA

Ova knjiga je objavljena uz podršku Ministarstva prosvete,  
nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

Slobodan Perović:  
KVANTNA REVOLUCIJA  
– OTKRIĆE SUBATOMSKOG SVETA

Copyright © 2019 by Slobodan Perović  
Copyright © 2019. za srpsko izdanje, Heliks

*Izdavač*  
Heliks

*Za izdavača*  
Brankica Stojanović

*Lektor*  
Vesna Đukić

*Recenzenti*  
Živan Lazović  
Lidija Živković  
Boris Kožnjak  
Vojin Rakić  
Vojislav Božičković  
Drago Đurić

*Štampa*  
Artprint Media, Novi Sad

*Tipografija*  
Minion Pro i Metro Nova Pro

Prvo izdanje

ISBN: 978-86-6024-023-3

Smederevo, 2019.

[www.heliks.rs](http://www.heliks.rs)

# Sadržaj

<i>Uvod</i> .....	7
<b>I OD LABORATORIJE DO TEORIJE: INDUKTIVNO IZVOĐENJE TEORIJE IZ EKSPERIMENATA.</b> ....	15
1. <b>Savremena debata o indukciji</b> .....	17
1.1 Teorija učenja .....	24
1.2 Materijalna teorija indukcije.....	26
1.3 Induktivno izvođenje hipoteza iz eksperimentalnih rezultata .....	29
1.3.1 Specijalna teorija relativnosti .....	45
1.3.2 Teorija elektromagnetizma.....	47
1.3.3 Otkriće DNK .....	49
1.4 Opažanja i hipoteze: na tragu Dejvida Boma.....	52
2. <b>Induktivno izvođenje kvantne mehanike u dva stadijuma</b> .....	56
<b>II POČETAK REVOLUCIJE: INDUKTIVNO IZVOĐENJE RANE KVANTNE TEORIJE IZ EKSPERIMENTALNIH REZULTATA.</b> ...	65
3. <b>Fizika u laboratorijama na prelazu iz 19. veka u 20. vek</b> .....	67
4. <b>Ka centralnoj hipotezi: modeli atoma</b> .....	77
5. <b>Posredujuća hipoteza: princip korespondencije</b> .....	87
6. <b>Klasični aspekti atoma i kvantna fizička stanja</b> .....	90
<b>III REVOLUCIJA: INDUKTIVNO IZVOĐENJE KVANTNE MEHANIKE IZ EKSPERIMENTALNIH REZULTATA</b> .....	93
7. <b>Ključni eksperimenti: interakcije svetlosti i materije</b> .....	95
8. <b>Šredingerova fizika i metafizika</b> .....	101
9. <b>Hajzenbergov doprinos i njegov instrumentalizam</b> .....	106

10. Princip komplementarnosti kao centralna hipoteza kvantne mehanike .....	111
11. Šredingerov drugi pokušaj .....	114
12. Nils Bor i njegova induktivistička vizija fizike .....	117
12.1 Kritike i nerazumevanje Borovog metoda .....	117
12.2 Borov metod u praksi .....	119
<b>IV KVANTNO-MEHANIČKA LEKCIJA O INDUKCIJI: PRAVILA IZVOĐENJA TEORIJE IZ EKSPERIMENATA .....</b>	<b>129</b>
13. Posle revolucije .....	133
14. Kopenhagenska ortodoksija: mit i realnost .....	135
15. Debata između Ajnštajna i Bora o osnovama kvantne mehanike .....	144
16. Simetrije u fizičkom svetu .....	155
17. Debata o teoriji petlji kvantne gravitacije .....	159
<i>Reference</i> .....	165
<i>O autoru</i> .....	175

# Uvod

Kvantna mehanika je nesumnjivo najznačajnija teorija o mikrofizičkom svetu i fizičkom svetu uopšte koju je fizika ikada iznedrila. Ova do sada eksperimentalno najbolje potvrđena teorija zadire u sam osnov fizičke strukture dovodeći do iznenađujućih uvida o njenim svojstvima. Razvoj kvantne mehanike bio je rezultat zajedničkog napora čitave generacije fizičara u prvoj polovini 20. veka, i stoji u kontrastu prema specijalnoj i opštoj teoriji relativnosti koje su, iako motivisane raznolikim teorijskim i matematičkim pristupima i eksperimentalnim uvidima, ipak dobrim delom postignuće jedne osobe.

Predmet ove knjige je složeni proces nastanka kvantne mehanike. U pitanju je rekonstrukcija ključne epizode u savremenoj nauci na osnovu koje se prepoznaju najvažnija svojstva eksperimentalne metode u modernoj fizici pre nego što je ova naučna disciplina, u drugoj polovini 20. veka, dobila industrijske razmere. Knjiga je sveobuhvatna filozofski motivisana istorijska analiza naučnog metoda u fizici, posebno usredsređena na međusobnu prepletenost teorije i eksperimenta u blisko povezanoj zajednici fizičara. Bavićemo se ponajviše načinom na koji je novonastala teorijska slika fizičkog sveta u vidu kvantne mehanike, podstaknuta pre svega raznovrsnim rezultatima eksperimentisanja sa mikrofizičkim fenomenima, stvarana na osnovu veoma različitih vizija toga šta je fizika i kako bi trebalo da izgleda odgovarajući pristup istraživanjima fizičkih fenomena.

Pojam naučne revolucije se obično vezuje za shvatanje razvoja nauke koje je izneo američki filozof nauke Tomas Kun. Kun je zastupao gledište po kojem se naučne paradigme, kao skupovi srodnih teorijskih stanovišta o fizičkim fenomenima koja počivaju na dominantnim principima, smenjuju putem revolucije u kojoj trenutno prihvaćena paradigma biva zamenjena novom, čiji su principi i pojmovi koji opisuju fizički svet suštinski nesamerljivi sa tom prethodnom paradigmom. Empirijska evidencija, posmatranja i eksperimentalni rezultati, u takvom procesu su oblikovani novom teorijskom paradigmom, pa stoga ne može ni biti induktivnog izvođenja nove paradigme iz posmatranja i eksperimentalnih rezultata. Nastojaću da u ovoj knjizi pokažem kako je razvoj kvantne mehanike upravo suprotan proces Kunovom shvatanju naučnih revolucija. Taj razvoj je u stvari bio revolucija „odozdo“: novi teorijski okvir je postepeno induktivno izveden iz eksperimentalnih rezultata, počev od nižih eksperimentalnih hipoteza, preko posredujućih hipoteza ograničenog dometa, do centralnih hipoteza, koje su vodile ka transformaciji ili zameni teorijskih pojmova klasične njutnovske mehanike, a kasnije i klasične elektrodinamike. Eksperimenti i pojmovi razvijeni na osnovu eksperimentalnih pojedinosti igrali su ključnu ulogu u formiranju kvantne mehanike i svih njenih pojmovnih implikacija suprotnih klasičnoj mehanici i uobičajenim intuicijama o fizičkim fenomenima.

Dešavanja o kojima ova knjiga govori odigrala su se pre više od stotinu godina. Uprkos centralnoj ulozi kvantne mehanike u savremenoj fizici, proučavanja događaja kojima se ova knjiga bavi u oblasti istorije i filozofije nauke polako počinju da se doživljavaju kao antikvarno vredna. Ona razumljivo gube značaj usled uzbudljivih zbivanja u savremenoj fizici. Ipak, videćemo ne samo da ta pitanja i odgovori na njih mogu da posluže kao glavni faktori na kojima se temelje savremeni pokušaji razumevanja uloge indukcije u nauci i naučnog metoda uopšte, nego i da su određene uzavrele debate u fizici, poput one o teoriji petlji kvantne gravitacije (Loop Quantum Gravity – LQG), motivisane istom vrstom problema i intelektualnih tenzija koje srećemo u razvoju kvantne mehanike.



U svojoj prethodnoj istorijsko-filozofskoj analizi naučnog metoda u fizici, ključne rezultate i način na koji su do njih došli fizičari koji su učestvovali u kvantnoj revoluciji, tumačio sam uglavnom u funkciji boljeg razumevanja metoda i argumenata Nilsa Bora (Perović 2013, 2016, 2017). U ovoj knjizi ću, međutim, ponuditi opsežniju analizu njihove uloge, kao i pristupa razvoju kvantne mehanike i aspekata naučnog metoda koji su bili karakteristični za njihove doprinose. Ovo se naročito odnosi na Hajzenbergove, Ajnštajnove i Dirakove doprinose. U prethodnim radovima razvio sam i nekoliko argumenata (2008a, 2013) o Borovim postignućima sredinom treće decenije 20. veka i njegovim osnovnim filozofskim stavovima koji su odredili njegov pristup kvantnim fenomenima, ograničavajući se na njegov pojam komplementarnosti, odnosno na razvoj kvantne mehanike kakvu danas poznajemo. Ovde argumentaciju proširujem sa principa komplementarnosti na Borova ranija velika otkrića, tj. na razvoj *stare kvantne teorije* (model atoma i princip korespondencije), kao i na zreli period Borovog naučnoistraživačkog rada nakon formulisanja principa komplementarnosti; to će biti ključni argument u prilog centralnoj tezi knjige o prirodi indukcije u fizici. Ranije sam već identifikovao elemente bekonovske indukcije u Borovom pristupu fizici, imajući u vidu samo njegov princip komplementarnosti, ali ovde nudim obuhvatnu rekonstrukciju induktivnog metoda u celokupnoj istoriji ranog razvoja kvantne teorije i kvantne mehanike. Takođe ću u poslednjim poglavljima pokazati ograničenja takvog dominantno induktivnog pristupa u fizici. Doprinosi ostalih učesnika koordinisani su u okviru te šire induktivne strukture koju je Bor gradio prvenstveno svojim uvidima i autoritetom. Ovo naročito važi tokom nastanka rane kvantne teorije, u prvoj fazi kvantne revolucije, u kojoj je Bor došao i do dva ključna rezultata. U drugoj fazi, rezultati drugih fizičara – među njima i Šredingera, Hajzenberga, Ajnštajna i Diraka – bili su supstancijalniji, ali ih je Bor uspešno koordinisao uključivši ih u generalnu hipotezu. Njegov rezultat u trećoj fazi, posle uspostavljanja apstraktne verzije teorije, nije toliko značajan koliko onaj u ranoj kvantnoj teoriji (do dvadesetih godina 20. veka), ali i te

ranije postignute rezultate anahrono i pogrešno razumevaju istoričari i filozofi fizike, pa i sami fizičari, zbog prevelikog značaja koji se daje poznoj fazi njegovog rada.<sup>1</sup>

Upoznaćemo se, pre svega, sa eksperimentalnim kontekstom fizike u kojem je nastala kvantna revolucija. Fizika se praktično sve do Drugog svetskog rata i pojave velikih laboratorija poput CERN-a razvijala u mnogim manjim laboratorijama. U njima je specijalizacija na strogo teorijske i eksperimentalne fizičare bila tek u začetku. Fizičari u laboratorijama su po pravilu bili direktno uključeni u eksperimentalni rad koliko i u teorijski. Nепrekidan priliv raznovrsnih eksperimentalnih rezultata konstantno je napajao teorijske ideje, a teorijske ideje su proveravali najčešće sami fizičari koji su do njih došli, bez izvođenja takoreći naručenih eksperimenata.

Takvu spregu teorije i eksperimenta karakterišu dva jasno podeljena stadijuma induktivnog izvođenja hipoteza iz eksperimenata koje ćemo u prvom delu knjige detaljno razmotriti, prvo kao opšti okvir naučnog metoda, a zatim i na primeru razvoja kvantne mehanike. Upoznaćemo se najpre sa savremenim i često oprečnim idejama o indukciji, poput *teorije učenja* i *materijalne teorije indukcije*, koje se tiču pre svega razvoja fizike i identifikovanja induktivnog metoda u toj nauci, da bismo potom prešli na rekonstrukciju induktivnog metoda onako kako se on pokazivao u razvoju kvantne mehanike. U ovom delu knjige iscrpno je opisan opšti okvir induktivnog postupka u fizici kao uvod u prikaz razvoja kvantne mehanike do kojeg se došlo pre svega zahvaljujući primeni tog metoda. Kvantna mehanika je ključni primer toga šta induktivni metod može da proizvede u procesu naučnog saznanja,

---

<sup>1</sup> Odeljci 1.1, 1.2, 1.3.1, 1.3.2, 1.3.3, i 1.4 u 1. poglavlju, deo II, poglavlja 8, 9, 11 i odeljak 12.2 u delu III, i poglavlja 15, 16, i 17 u delu IV, sastoje se od potpuno novih argumenata i analize. Iako odeljak 1.3 i poglavlje 2, kao i ostatak delova III i IV sadrže potpuno nove argumente u vezi s indukcijom u fizici, ili novu analizu istorijskog konteksta u kojem se ona pojavljuje, ti se odeljci mestimično oslanjaju i na autorove objavljene radove ili mestimično preuzimaju argumente i analize koji se u tim poglavljima i odeljcima navode, dalje razvijaju i dopunjuju.

kao i toga kad je opravdano preći na teorijski i matematički motivisane uvide u relevantne fizičke fenomene pre nego na eksperimentalno motivisane uvide.

Ukratko, kad je reč o ulozi indukcije u nauci, prvi stadijum prikupljanja podataka i selekcije odgovarajućih aspekata eksperimenta pomoću bazičnih hipoteza postepeno vodi ka drugom, apstraktnom stadijumu, gde čula više ne igraju nikakvu ulogu i gde se bazične hipoteze bliske eksperimentima povezuju u što opštije hipoteze o proučavanom fizičkom fenomenu. Ovakav postupak je bio odlučujući zato što je koordinisao različite pristupe u istraživanjima i različite rezultate, pa je razumevanje Borovog pristupa i metoda u isti mah i razumevanje metoda koji je proizveo kvantnu mehaniku. Opisaćemo generalni induktivni metod koji je raznorodne rezultate uobličio u teoriju; njih je Bor u dva navrata, u ranoj kvantnoj teoriji i kasnije u kvantnoj mehanici, koordinisao i objedinio. Precizno ćemo identifikovati i odrediti odnose između eksperimentalnih rezultata, često vrlo iznenađujuće, i teorija koje su na osnovu tih rezultata induktivno izvedene ili su sa njima bile blisko povezane.

U svojim promišljanjima eksperimentalnog metoda sam Nils Bor ističe upravo ovakvu dvofaznu prirodu eksperimentalnog procesa. U tom procesu, eksperimentalni rezultati se pažljivo prikupljaju i opisuju unutar svakodnevnih iskustava. Eksperimentalni podaci se iznose u formi izveštaja o određenim osobinama i pojedinostima eksperimenta. Te pojedinosti se često opisuju klasičnim fizičkim pojmovima. Nakon temeljnog sprovođenja ovog postupka, počinje teorijska faza indukcije. U njoj se zabeleženi podaci i karakteristike eksperimenta sintetišu kroz izvođenje opštih i posredujućih hipoteza koje ih mogu objasniti na zadovoljavajući način. Takve hipoteze se najčešće ne slažu sa duboko usađenim metafizičkim i intuitivnim preferencijama na kojima počivaju teorijska očekivanja. Upravo je to bio slučaj kada je tokom prve dve decenije 20. veka nastajala kvantna teorija, a kasnije i kvantna mehanika. Pre nego što prikažemo kako je takvim induktivnim postupkom izgrađena kvantna mehanika, navešćemo još neke primere takve primene indukcije, a naknadno

ćemo formulisati heuristička pravila koja vode istraživače kroz proces indukcije teorije iz eksperimentalnih rezultata.

U drugom delu knjige, možda ključnom segmentu argumenta u prilog glavne teze o ulozi induktivnog metoda u savremenoj fizici, analiziramo način na koji su iz eksperimentalnih rezultata postepeno razvijani modeli atoma, sve do Borovog provizornog, u početku kontroverznog ali empirijski najadekvatnijeg modela. Postepeni dolazak do tog modela kroz sjedinjavanje mnoštva eksperimentalnih rezultata, ili, tačnije, spajanje pojedinačnih eksperimentalnih hipoteza u jednu centralnu hipotezu, bio je potpomognut principom korespondencije. Posebna vrsta korespondencije između kvantnih i klasičnih stanja kao posredujuća hipoteza, povezala je niže eksperimentalne hipoteze i Borovu apstraktnu centralnu hipotezu o strukturi atoma.

U ovom delu knjige ćemo, takođe, razjasniti razliku između klasičnih i kvantnih fizičkih stanja, imajući u vidu kako su ona shvaćena u induktivnom postupku. Prvi stadijum formiranja bazičnih eksperimentalnih hipoteza nižeg reda oslanja se isključivo na opise svakodnevnih fizičkih stanja, dodatno objašnjenih i izraženih klasičnim fizičkim pojmovima u kojima nema mesta za kvantne teorijske pojmove. Do njih se dolazi tek postepeno, kroz sve opštije hipoteze koje objedinjuju one najniže, eksperimentalne. Pojam kvantnih stanja je, dakle, produkt isključivo drugog, teorijskog stadijuma formiranja hipoteza u kojem se uvode kvantni pojmovi ne-lokalnosti i ne-diskretnih fizičkih stanja. Ovaj deo analize jasno ukazuje na to da induktivni metod, kako ga mi tumačimo, nema veze samo s pojedinačnim doprinosom Nilsa Bora koji se ogleda u principu komplementarnosti razvijenom sredinom dvadesetih godina prošlog veka, već se manifestuje i u svim ključnim koracima ranog razvoja kvantne teorije.

Treći deo detaljno prati razvoj Šredingerovog i Hajzenbergovog pokušaja da izgrade svoje veoma različite verzije opšte hipoteze mikro-fizičkih stanja, talasno-mehaničku i matično-mehaničku hipotezu. Ta dva fizičara su, shodno svojim suprotnim epistemološkim preferencijama, razvila naoko kontradiktorne hipoteze, kontradiktorne kako u pogledu formalnog pristupa tako i u vezi s pretpostavkama

njihovih teorija o tome kakva može uopšte da bude osnovna priroda mikrofizičkih stanja. Iako ambiciozne, to su zapravo bile limitirane hipoteze, usklađene samo sa izvesnim eksperimentalnim rezultatima (Perović 2008a). Njih je Nils Bor induktivnim postupkom, istim onim kojim je došao do modela atoma, sjedinio kao međusobno komplementarne, u novu centralnu hipotezu. Put do te hipoteze, kao i do savremene kvantne mehanike, vodio je postupno od novih eksperimentalnih rezultata i na osnovu njih induktivno izvedenih bazičnih hipoteza, preko naoko suprotstavljenih posredujućih hipoteza o čestičnoj i talasnoj prirodi kvantnih stanja, koje su imale ograničeno važenje u odnosu na eksperimentalni kontekst. Šredingerovi metafizički stavovi, Hajzenbergov instrumentalizam i Dirakova i Fon Nojmanova matematizacija pitanja u vezi s kvantnim stanjima, predstavljaju različite pristupe koji su iznedrili modernu kvantnu mehaniku. Sam Nils Bor bio je središnja figura kvantne revolucije kao koordinator svih tih različitih pristupa i ideja. Neke od njegovih teza, naročito njegov princip komplementarnosti, i danas su predmet rasprave upravo zbog nedovoljnog razumevanja njegovog doprinosa u kvantnoj revoluciji.

Pristup razumevanju mikrofizičkih stanja na osnovu hipoteze o komplementarnosti nije bio samo puka provizorna sinteza u nedostatku bolje, već se ispostavio kao veoma plodonosan. To se jasno pokazalo u slučaju otkrića kvantnog efekta tunelovanja u njegovim različitim oblicima, u kojima je teorijski okvir komplementarnosti odigrao ključnu ulogu (Perović 2017). Ipak, ta sinteza je postala i žrtva sopstvenog uspeha, jer je s vremenom poistovećena sa amalgamom raznolikih ideja u vidu takozvane kopenhagenske<sup>2</sup> interpretacije kvantne mehanike.

U četvrtom delu knjige videćemo da, suprotno uvreženom verovanju, ovaj koliko popularni toliko pojednostavljeni kontroverzan pojmovni i teorijski okvir za razumevanje kvantne mehanike, u

---

<sup>2</sup> U naučnoj literaturi na srpskom jeziku uobičajeno je korišćenje dva prisvojna oblika, kopenhaški i kopenhagenski. (*Prim. ur.*)

stvari ima manje direktne veze sa idejama do kojih se došlo sredinom dvadesetih godina 20. veka. To je možda i najvažniji rezultat naše metodološke analize kvantne revolucije koji predočavamo čitaocima i koji bi trebalo da doprinese jasnijem razumevanju toga što se desilo tokom intelektualnog previranja u kvantnoj revoluciji i neposredno nakon nje, kao i shvatanju prirode naučnog metoda koji je doneo tu revoluciju.

U tom delu knjige videćemo takođe koliko su eksperimentalno orijentisani induktivni metod i metodološke dileme, preovlađujući među fizičarima koji su razvijali kvantnu mehaniku u prvim decenijama prošlog veka, još uvek zastupljeni u savremenoj fizici. Polarizacija mišljenja u debati o ujedinjenju kvantnih fenomena i gravitacione sile odvija se na način vrlo sličan onom koji smo sreli u raspravama između glavnih aktera kvantne revolucije, gde su eksperimentalni rezultati odigrali višestruku ulogu koja prevazilazi puko testiranje hipoteza.

Dugujem svoju zahvalnost za razne stadijume osmišljavanja i pisanja ove knjige brojnim kolegama. Oni su mi pomagali tokom godina i decenija rada na istoriji i filozofiji kvantne mehanike. Iako nije moguće pomenuti sve njih, navešću neke: Alan Frenklin, Džon Norton, Džagdiš Hatijangadi, Milan Ćirković, Leon Kojen, Živan Lazović, Nada Dumić, Emina Peruničić, Ljiljana Radenović, brojni studenti na Odeljenju za istoriju i filozofiju nauke Univerziteta u Pitsburgu i na Odeljenju za filozofiju Univerziteta u Beogradu, učesnici međunarodne serije konferencija „Filozofija naučnog eksperimenta“, kao i mnogobrojni članovi Instituta za istoriju nauke Maks Plank u Berlinu.



Od laboratorije do teorije:  
induktivno izvođenje teorije  
iz eksperimenata

# 1

## Savremena debata o indukciji

U filozofskim raspravama indukcija je dugo bila predmet istraživanja na vrlo apstraktnom nivou koji je retko imao direktne veze sa rasuđivanjem u nauci, ili sa konkretnim istorijskim epizodama poput razvoja kvantne mehanike. Filozofi su uglavnom bili fokusirani na razmatranja problema indukcije koji je navodno proizašao iz Hjumovog shvatanja induktivnog zaključivanja. Naime, Hjum se pitao da li postoji osnov za zaključak o pravilnostima koje se tiču bilo kojeg opaženog fenomena, povrh naših prošlih iskustava, u vezi sa tim fenomenom. Postoji li, na primer, razlog da verujem da će Sunce ponovo izaći sutra ujutro, osim što sam opažao njegove izlaske? Hjum kaže da nema nikakvog dodatnog razloga, niti da ga može biti, da zaključim tako nešto osim iskustva i samim tim moje navike da donosim takve sudove. Ovo je enumerativna indukcija (indukcija nabranjem), to jest, induktivno izvođenje suda o nekom fenomenu posredstvom navedenih prošlih instanci tog fenomena. Induktivno zaključivanje u nauci je svakako znatno komplikovanije jer je i priroda uzoraka, pa time i „prošlih iskustava“ koja su ih proizvela, često kompleksnija od pukog pojedinačnog posmatranja Sunčevog izlaska. Iako Hjumov problem indukcije može biti zanimljiv i relevantan čak i za prirodu naučnog saznanja, induktivno izvođenje naučnih teorija iz posmatranja i eksperimenata predstavlja znatno složeniji proces, u kojem je enumerativna indukcija samo jedan aspekt.



Složenijim i po fokusu drugačijim vidom indukcije, različitim od enumerativne i aristotelovske indukcije, i prikladnijim procesu naučnog saznanja, bavili su se mislioci pre i tokom naučne revolucije u 17. veku. Rodžer Bekon jedan je od prvih mislilaca koji je formulisao osnove eksperimentalnog metoda, detaljnije ih je razradio Frensis Bekon, a precizno formulisao Džon Stjuart Mil.

Neki autori smatraju da je induktivni metod zapravo korišćen još u antičko doba a tada je i njegova priroda filozofski rasvetljena, dok je moderna nauka rezultat njegove dosledne primene. Istorijski informisani filozofi nauke znaju, ili bi bar trebalo da znaju, da postoji suštinski kontinuitet između antičke filozofije i moderne nauke, i u pogledu razumevanja i u pogledu praktikovanja metoda saznavanja prirodnih fenomena. Tako je, s jedne strane, Galilejev metod pomoću kojeg je došao do zakona kretanja koji su predstavljali početak klasične mehanike, bio u velikoj meri produžetak upotrebe Aristotelovog induktivnog metoda (Rovelli 2015). Osim toga, znamo da je, s druge strane, Aristotel bio jedan od prvih uspešnih eksperimentatora jer je secirao kokošja jaja stara od jednog do dvadeset jednog dana ne bi li otkrio kompletan razvoj embriona.<sup>3</sup> Ipak, postoje dve glavne razlike između aristotelovskog filozofskog pristupa prirodi i moderne nauke. Prvo, za razliku od sporadične uloge u antici, eksperimentisanje je postalo centralno oruđe modernog naučnog znanja i osnovno sredstvo induktivnog izvođenja i provere hipoteza. Značaj Bekona, koji se često suprotstavlja Aristotelu po pitanju induktivnog metoda, nije u njegovom navodno ekstremnom empirizmu, na primer, u tvrdnji da sve znanje potiče od čula, već pre u njegovom razumevanju različitih faza eksperimentalne interakcije između ljudskog uma i prirode. Drugo, filozofski pojmovi su u modernoj nauci dobili drugačiju ulogu, ulogu pojmovnog okvira koji bi trebalo da

---

<sup>3</sup> Takođe znamo da je Aristotel, brojeći ljudske zube, zaključio da muškarci imaju više zuba od žena. On to nije učinio u naivnom seksističkom maniru, uprkos tome što je Bertrand Rasel cinično tvrdio suprotno. Ispostavlja se da je Aristotelova procena verovatno tačna zbog toga što su žene prerano gubile zube usled mnogobrojnih trudnoća.

se proverava na samim fenomenima. Kada uzmemo ta dva glavna aspekta savremene nauke zajedno, oni se neizbežno sukobljavaju sa aristotelovskim pristupom prirodnim fenomenima, što nijedna istorijsko-filozofska analiza ne bi trebalo da gubi iz vida.

Pojedini autori su, recimo, aristotelovski pristup pokušali da reafirmišu u obliku koji bi bio usklađen sa modernim naučnim metodom, ili bi predstavljao rani stadijum, pokušavajući tako da ga spasu od optužbe da je irelevantan za saznanja stečena u modernoj nauci (Rovelli 2015, Groarke 2009). Prema njihovom mišljenju, nema mnogo sadržaja u modernoj nauci koji su u suprotnosti sa aristotelovskim filozofskim uvidima i metodologijom. Drugim rečima, detaljnije upućivanje u Aristotelovo proučavanje prirodnih fenomena govori nam da su njegovi uvidi bili zapravo neizbežni zato što se zasnivaju na uobičajenim kapacitetima za induktivno zaključivanje koji su nam svima zajednički, što je i sam Aristotel jasno pokazao. Shodno tome, valjanost načina na koji se do njih došlo ne može da bude uzdrmana novijim saznanjima, pa ni onima stečenim u modernoj nauci. Ovaj induktivni kapacitet u osnovi je Aristotelovih uvida u prirodne fenomene i pruža temelj naučnog saznanja.

Jedan primer koji potkrepljuje taj stav je Aristotelov uvid da zvezde moraju biti udaljenije od planeta zbog toga što trepere (Groarke 2015). Takav sud je rezultat saradnje uma i čula koji se neizbežno nadopunjuju prilikom njegovog izvođenja, jer je princip na osnovu kojeg je sud donesen – naime, da bliski izvori svetla ne trepere – izveden kao univerzalan iz svakodnevnog iskustva. Dakle, Aristotelov sud nije ishitreno donet prema pukom posmatranju, već se bazira na induktivno izvedenom univerzalnom principu: što je izvor svetla udaljeniji od nas, to je njegovo dejstvo na naše čulo vida sve slabije.

Problem je to što bi ovaj *prima facie* ubedljiv princip, čiju nužnost ne možemo da izbegnemo, mogao da spreči naše razumevanje prirode svetla. Da se nauka pridržavala tog principa kao fundamentalnog, ona ne bi mogla da se oslanja na teoriju koja deli izvore svetlosti na divergentne i nedivergentne. Prvi princip primenljiv je na divergentne izvore koji svetlost emituju u svim pravcima: što je neko dalje

od izvora svetla, ovaj na njega ima sve manje efekta. Ali nedivergentni izvori vidljivog svetla, poput lasera, kod kojih se javlja koherencija svetla u fazi, frekvenciji i amplitudi, očito se opiru tom principu. Zato, na primer, možemo da pošaljemo laserski zrak do Meseca ne bismo li izvršili merenje, praktično bez ikakve divergencije energije. Aristotel, prema tome, izvodi ispravan zaključak baziran na pogrešnim premisama, pošto nije svestan vrlo specifičnih uslova pod kojima je njegov zaključak tačan. Ovo u stvari i nije naročito velika metodološka greška – u nauci se događa stalno – ali dovodi u pitanje opravdanost proglašavanja bilo kojeg opšteg suda principom koji ima više od heurističkog, upotrebnog i privremenog statusa.

Šta je sa principima logike, kao što je zakon neprotivrečnosti, koji neki autori smatraju prvim principom? Takvi principi zaista moraju imati status prvih principa, bar ako se sledi Aristotelovo shvatanje načina na koji dolazimo do saznanja. Ali oni su zapravo suviše apstraktni i ne kažu nam gotovo ništa konkretno o prirodnom svetu. U stvari, mi možemo utvrditi jesu li uistinu prvi principi tek kada ih primenimo na neki sadržaj. Kada to i učinimo, pokazuje se da su oni sredstvo, isto onoliko koliko i matematička „pomagala“, pomoću kojih razjašnjavamo hipoteze u tipično vrlo uskim domenima prirodnog sveta. Oni, međutim, ne obezbeđuju uvide u prirodu sveta, niti na osnovu njih možemo generisati bilo kakvo opštevažeće znanje.

Istrajavanje na posebnim logičkim principima i formalnim okvirima može takođe da omete razvoj naučnog saznanja. Neke od najuspešnijih naučnih teorija – u pogledu prediktivne i eksplanatorne moći – mogu biti nekonzistentne. Ne moramo u tom smislu ni da uzimamo u obzir možda najčudniju teoriju kojom ćemo se baviti u ovoj knjizi, naime kvantnu mehaniku. Neočekivani kandidat za ključni primer nekonzistentne teorije jeste klasična teorija elektromagnetizma koja je izgrađena na prelazu 19. veka u 20. vek. Tačkasta naelektrisanja i naelektrisano polje su dva fundamentalna, iako nekonzistentna aspekta te teorije, koji se zapravo međusobno isključuju. Friš (Frisch 2005) pokazuje da logička analiza teško da može utvrditi konzistentnost ova dva pojma. Ovo je predmet skorije rasplamsale

debate među filozofima fizike o formalno-logičkim osnovama naučnog saznanja i postojanju osnovnih logičkih principa. Moguće je da su matematički formalizmi znatno fleksibilniji u kontekstu formulisanja hipoteza nego što su to vrlo specijalizovani formalizmi formalne logike, te utoliko ovi drugi nemaju fundamentalnu saznavnu vrednost niti široku primenu u izgradnji naučnih teorija.

Mnogi zanimljivi pokušaji da se razvije konzistentna logika kvantnih stanja nisu urodili plodom, što je dodatno uzdrimalo verovanje da je u pitanju samo tehnički problem. Krajnje apstraktna teorija, veoma udaljena od fenomena, može da izbegne nekonzistentnost, što bi bilo u skladu sa očekivanjima autora koji brane aristotelovski pristup induktivnom rasuđivanju. Međutim, u nekim situacijama se moraju po strani staviti brige u vezi s nekonzistentnošću i protivrečnošću zarad teorije uspešne prediktivne i eksplanatorne moći. U tom slučaju, izbegavanje kontradikcija po svaku cenu može biti loš metodološki savet.

Aristotelova opšta epistemološka teza da svet i ljudski um poseduju nepromenljivu prirodu koja se može podvesti pod najopštije logičke principe (Groarke 2015, 367), po svojoj prilici je najproblematičnija pretpostavka aristotelovskog induktivnog metoda. Tačno je da je saznanje rezultat susreta između sveta i ljudskog uma, i da ne bi trebalo nijednoj od te dve strane davati prevagu u tumačenju epistemološkog okvira ljudskog saznanja. Ali susret između te dve strane nije jednoznačan onako kako se to po gorenavedenoj pretpostavci podrazumeva, bar kada su u pitanju neki domeni naučnog saznanja o prirodnim fenomenima. Sam svet možda i nema definitivnu prirodu u jakom smislu koji implicira strukturalnu nepromenljivost ili deterministički karakter fizičkih zbivanja. U poslednjih dvesta godina o fizičkom svetu naučili smo samo to da postoje teškoće pri njegovom razumevanju u svetlu ideje o nepromenljivim supstancama čija svojstva su determinisana i mogu precizno biti definisana. Sa takvom slikom fizičkog sveta upoznaćemo se detaljnije kada budemo razmatrali Hajzenbergov pristup kvantnim fenomenima i probabilistički karakter Šredingerove jednačine koji je zasnovao Maks Born.

U neoesencijalističkom, ili zapravo neoaristotelovskom pristupu razumevanju naučnog saznanja pokušava se da se, pre svega na primeru hemije, obnovi Aristotelov pojam esencije kao osnove saznanja u okviru moderne nauke. Na prvi pogled, to izgleda kao uspešan pokušaj oživljavanja Aristotelovog projekta. Brajan Elis, jedan od autora koji pripada tom talasu, sumira ovo gledište: „Supstanca u čaši ispred mene ne bi bila voda da nema strukturu  $H_2O$ , iako bi mogla biti poput vode po svojim pojavnim aspektima poput ukusa, funkcije i slično“ (Ellis 2014, 397). Drugim rečima: „U svetlu opsežne evidencije sakupljane kroz viševjekovno pažljivo i marljivo istraživanje u hemiji, možemo sa sigurnošću tvrditi da je voda  $H_2O$ , iako je, naravno, moguće da se ovaj opis može unaprediti [...] ali šta god da naučimo u budućnosti u vezi s opisom vode, to neće moći da bude u kontradikciji sa ovim što je pokazano da je istinito“ (Gorarke 2015, 397–8). Još eksplicitnije, postoji suštinska struktura tečnosti u datoj čaši i upravo zahvaljujući toj strukturi ta tečnost jeste voda. Ovaj uticajni argument izložen je u raznim oblicima prošlih nekoliko decenija.

Preciznost opisa tečnosti na molekularnom nivou ipak zavisi od analize molekularnih veza i čestica koje u njima učestvuju. A veza između ova tri nivoa (pojnog nivoa, nivoa hemijskih elemenata i nivoa molekula i čestica) složena je; analiza nam otkriva različite substrukture, prostorne i elektrohemijske, koje nastaju u različitim realizacijama strukture  $H_2O$ . Pojam hemijskog elementa pokazao se korisnim u nekim kontekstima, a u nekim drugim suviše grub, recimo u slučajevima u kojima je potrebno biti obazriv i precizan u pogledu finijeg i detaljnijeg aspekta strukture hemijske supstance, pri čemu se poseže za upotrebom kvantnih aspekata molekularnih orbitala. Uzevši u obzir inherentnu kompleksnost analize odgovarajuće molekularne strukture, pokušaj oživljavanja pojma esencije na osnovu teorije u hemiji teško da može biti uspešan.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Vidi argumente sumirane u „Zašto voda nije  $H_2O$ , i druge kritike esencijalističke ontologije u filozofiji hemije“ (VandeWall, H. 2007).

Aristotelovska teorija indukcije, koja se poziva na saznanje nužnih prvih principa ili na pojam esencije, suviše je optimistična i naivna – ako uzmemo u obzir složenost sveta o kojoj stičemo saznanja na osnovu toga kako nas proučavanje tog sveta suočava sa prirodnim fenomenima – i iznuđuje stalno testiranje svih pretpostavki koje su izgledale fundamentalne, manipulisanje njima i njihovo preispitivanje.

Ukoliko se filozofi nauke u 20. veku nisu bavili pomenutim istorijskim aspektima teorija indukcije ili Hjumovim problemom indukcije, posezali su često za vrlo apstraktnom shemom odnosa teorije i empirijske evidencije, odnosno uzoraka dobijenih posmatranjem i eksperimentima. Danas se preovlađujuće razumevanje induktivnog postupka zasniva na povećanju uverljivosti naučne hipoteze o datom fenomenu prikupljanjem nove evidencije. Formalno govoreći, Bajesova<sup>5</sup> formula nam omogućuje da takvu induktivnu shemu kvantifikujemo u obliku verovatnoće hipoteze pre i posle dobijene empirijske evidencije.

Hipotetičko-deduktivni model ukazuje na to da se indukcija odvija kao deduktivni proces, dakle kao uobičajeno konstruisanje argumenta (tj. premisa i zaključka) na osnovu postavljene hipoteze i evidencije. Ovakav induktivno-hipotetički pristup suprotan je stanovištu o induktivnoj generalizaciji prema kojem pojedinačna instanca, recimo posmatranje nekog fenomena, može pozitivno da potvrdi hipotezu.

Tokom 20. veka je detaljnije razvijana abdukcija, zaključivanje prema najboljem objašnjenju, po kojoj na osnovu raspoložive evidencije izvodimo najbolje moguće objašnjenje prirodnog fenomena na koji se ta evidencija odnosi.

Iako su ovi različiti pristupi indukciji zanimljivi, kao i mnogobrojni problemi sa kojima se oni suočavaju, ovde se nećemo upuštati u iscrpno razmatranje raznih teorija o induktivnom zaključivanju

---

<sup>5</sup> Iako je verna transkripcija autorovog prezimena *Bejz*, koristićemo ustaljenu transkripciju.

relevantnih za rasuđivanje o prirodnim fenomenima u nauci jer bi nas to odvelo daleko od glavnog cilja knjige. Opsežnih preglednih članaka o takvim diskusijama i o teorijama indukcije ima napretek. Mi ćemo se usredsrediti na upoređivanje dva novija i oprečna shvaćanja indukcije koja su motivisana objašnjenjem induktivnog procesa u nauci, a naročito u fizici, i koja, po našem mišljenju, vrlo jasno pokazuju da se induktivne sheme mogu primeniti samo na određene kontekste u nauci. Posle toga ćemo se okrenuti induktivnom postupku koji je obeležio kvantnu revoluciju.

Prvi pristup, *formalna teorija učenja*, jeste apstraktni formalni pristup induktivnom procesu koji se bazira na univerzalnosti Okamove oštrice, tj. principu jednostavnosti hipoteze bez obzira na pojedinačne činjenice na koje se ona odnosi. Nasuprot tome, *materijalna teorija indukcije* vidi induktivni proces kao formulisanje hipoteza na osnovu pojedinačnih konkretnih činjenica.

## 1.1 Teorija učenja

Formalna teorija učenja ili, sažetije, *teorija učenja*, jeste formalizovani pristup induktivnom zaključivanju čiji je cilj da identifikuje pouzdane obrasce izvođenja hipoteza u nauci (Kelly 2004, 2007). Ona je, u stvari, motivisana teorijom indukcije izgrađene na osnovu uvida u algoritamsku kompleksnost Kolmogorova i ulogu Okamove oštrice u kompjuterskim naukama, logici i matematici tokom šezdesetih godina prošlog veka. Za razliku od tradicionalne epistemološke analize – u kojoj su pojedinci shvaćeni kao epistemčki subjekti koji traže opravdanje za svoja verovanja – *teorija učenja* subjekte posmatra kao komputacione jedinice, a one na osnovu dostupnih podataka proračunavaju najjednostavniju moguću hipotezu. Kao ključni zahtev prilikom formulacije hipoteze postavlja se princip Okamove oštrice, odnosno jednostavnosti hipoteze. Cilj induktivne analize je da identifikuje pouzdana pravila pomoću kojih se od pojedinačnih podataka dolazi do najjednostavnije hipoteze; u idealnom slučaju, to će

biti kauzalna hipoteza (hipoteza o uzročno-posledičnim odnosima). Umesto principa racionalnosti, za kojima traga tradicionalna epistemološka analiza pozivajući se na plauzibilnost intuicija ili na uobičajenu praksu u nauci, *teorija učenja* pokušava da identifikuje ona pravila induktivnog zaključivanja koja nas približavaju istinitoj hipotezi. Drugim rečima, iako na duže staze naučno istraživanje dolazi do ispravne hipoteze u vezi s nekim skupom podataka o određenom fenomenu, pitanje je koja pravila obezbeđuju stabilnu i brzu konvergenciju ka istinitim hipotezama. Teorija treba da utvrdi ona pravila indukcije koja pružaju efikasnu konvergenciju.

Poreklo i deo motivacije metodološkog pristupa u *teoriji učenja* inspirisani su nekim rezultatima *mašinskog učenja* koje ima sve veću primenu u različitim oblastima. Kompjuter procesira date podatke na parsimoničan način, tako što ih sažima u jednostavnu hipotezu, tj. pravilo. Kada imamo skup mogućih hipoteza, najjednostavnijom među njima dobićemo efikasniju konvergenciju ka istini. Imajući to u vidu, brojni autori su identifikovali i formalno razvili niz procedura koje ispunjavaju taj zahtev.

U savremenoj fizici čestica, na primer, još od kasnih osamdesetih godina prošlog veka upotrebljavana su sredstva *mašinskog učenja* da bi se identifikovali pouzdani metodi za izbor hipoteza iz velikog broja podataka o sudarima čestica. To je posebno značajno kada se ima u vidu ogromna količina podataka na osnovu kojih treba formulisati hipoteze. Prilikom izbora hipoteze pokazalo se da će računar, pošavši od prethodno utvrđenih karakteristika čestica, u skladu sa minimalnim kriterijumima parsimonije i osnovnim zakonima održanja energije, impulsa i naelektrisanja, doći do istih hipoteza do kojih bi došli fizičari primenjujući te kriterijume na isti skup podataka. Kao što navodi jedan od autora tih testova: „U čisto induktivnom procesu [tj. bez dodatnih kriterijuma selekcije osim gore navedenih, prim. aut.] nikada nije potrebno više od jednog pravila i kvantnog svojstva kako bi se razlučili dozvoljeni skupovi hipoteza od onih nedozvoljenih“ (Valdés-Pérez i Erdmann 1994, 172). Takođe: „Iscrpna potraga u okviru modela kvarkova za barione za kojima



slede mezoni otkriva da se standardni modeli kvarkova izdvajaju kao skoro jedinstveno najjednostavniji, kada su komplementarni parovi [relevantnih čestica] nametnuti kao ograničenje“ (Ibid). U nekim testovima računar je čak uspešno predvideo adekvatne hipoteze za određeni skup podataka.

Kompjuterske analize pomoću procedura *mašinskog učenja* u ovom primeru idu u prilog zaključku da pouzdana pravila selekcije hipoteza ne iziskuju ništa više od ponavljanja postupaka zasnovanih na Okamovoj oštrici i na minimalnim teorijskim pretpostavkama, koji se primenjuju na sve veću količinu relevantnih podataka. Fizičari se ponašaju kao komputacione jedinice koje koriste ovakva pravila koja im brzo i stabilno omogućavaju da pouzdano utvrde kako se neće pojaviti nova evidencija koja će dovesti u pitanje njihov induktivni zaključak, tj. da će hipoteza biti valjana kakvi god da su novi rezultati eksperimenata. Slične vrste analiza izvedene su i u nekim drugim oblastima.

Mnogi autori smatraju da je prednost ovog pristupa indukciji u tome što su ta pravila univerzalna, odnosno ne zavise od pojedinačnog domena u kojima ih istraživači primenjuju. Ta pravila shvaćena su normativno, što znači da predstavljaju sredstvo pouzdanog vođenja ka zadatom cilju. Drugim rečima, ta pravila bi trebalo koristiti u zaključivanju, premda su delimično deskriptivna, to jest, opisuju induktivni proces u naučnom istraživanju.

## 1.2 Materijalna teorija indukcije

*Teorija učenja* očigledno odgovarajuće opisuje određene kontekste u kojima se odvija induktivni proces. U razvijenim oblastima fizike, u kojima već postoji jasna i eksperimentalno čvrsto ustanovljena teorijska struktura koja se dalje postupno proširuje novim eksperimentalnim testovima, izvođenja na osnovu parsimonije i relevantnih eksperimentalnih podataka predstavljaju pouzdan metod koji daje rezultate. Ali pitanje je da li se takvi induktivni postupci efikasne

selekcije hipoteza mogu primeniti na periode naučnog istraživanja koji su više eksploratorni i neizvesni, u kojima postoji veći broj suprotstavljenih teorijskih okvira, gde eksperimentalni rezultati nisu jednoznačni, a naučnici po pravilu čak ni u osnovnim crtama nisu sigurni sa kakvim fenomenima imaju posla. Takav je upravo primer ranog perioda razvoja kvantne mehanike, razvoja cele potpuno nove oblasti fundamentalne fizike, za razliku od fizike čestica posle Drugog svetskog rata koja se razvila na već postojećim fundamentalnim teorijama. U takvim slučajevima induktivni proces je mnogo bliži samom eksperimentalnom kontekstu i činjenicama do kojih u njemu dolazimo. Osnovna pravila izvođenja, pa čak ni bilo koji formalni aparat u njima, ne mogu se adekvatno primenjivati, a pojam jednostavnosti kao radna hipoteza teško da može imati odlučujuću ulogu kada se ponude sasvim različiti teorijski okviri i tumačenja grupe eksperimentalnih rezultata.

*Materijalna teorija indukcije* (Norton 2003) predstavlja stanovište u okviru kojeg se insistira na samim činjenicama o datim fenomenima kao na vodilji ka konstrukciji hipoteza i teorijskih struktura. To sve popularnije i dorađenije gledište izgleda znatno podesnije i realističnije u kontekstu razvoja sasvim novih teorija fizičkih fenomena izvedenih pomoću potpuno novih eksperimentalnih tehnika i činjenica, tačnije, u revolucionarnim periodima razvoja nauke. Ono istrajava na tome da su sva induktivna izvođenja lokalna, te da ne može da bude takvih univerzalnih pravila koja bi važila nezavisno od istraživačkog konteksta i empirijskih datosti. Sve induktivne sheme koje različiti filozofski pristupi indukciji pokušavaju da formulišu kao univerzalne, zapravo su rezultati pojedinačnih činjenica; te sheme opravdavaju samo te činjenice. Što je induktivna shema opštija, poput, recimo, tvrdnje da nabranje i ponavljanje instance fenomena opravdava induktivno zaključivanje o prirodi tog fenomena, to je slabija podrška izvedenom sudu. U suprotnom, što su induktivne sheme bliže samim činjenicama, to je podrška njihovom važenju jača.

Očekivano je da će se ovako ambiciozna tvrdnja, koja dovodi u pitanje čitavu istoriju bavljenja indukcijom u poslednje dve hiljade

godina i pretenduje na to da utvrdi dijagnozu tog neuspeha, fokusirati na analizu pojedinačnih primera koji joj idu u prilog. Jedino takvi primeri i njihovi detalji, odnosno sama naučna praksa, mogu nam jasno predočiti da u njima leži opravdanost induktivnog postupka. Tako je, recimo, otkriće hemijskih elemenata dalo pouzdane smerice razumevanju niza hemijskih transformacija za koje pre toga nismo imali uverljivo objašnjenje niti smo mogli da sa sigurnošću njima manipuliramo. Slično tome, kvantna svojstva atoma otkrivena u kvantnoj mehanici tokom dvadesetih godina 20. veka uspostavila su čvrsta pravila manipulacije hemijskim elementima na molekularnom nivou. Međutim, iza ovakvih pojedinačnih primera pozadinskog znanja do kojeg se došlo putem eksperimentalnog istraživanja specifičnih činjenica ne krije se nikakva univerzalna induktivna shema, niti se ona uopšte može identifikovati.

Džon Norton je ovu svoju teoriju dalje razvio kao odgovor na sve postojeće pristupe indukciji, počev od probabilističkog bayesovskog tumačenja, preko pristupa indukciji kao postupku potvrđivanja hipoteza evidencijom, do deduktivno-hipotetičkog pristupa. On je pritom ukazao na načine na koje svaki od tih pristupa zanemaruje činjenice i lokalni kontekst na kojima zapravo počiva opravdanost i snaga indukcije koja sve objašnjava.

Iako ova teorija u svom najjačem obliku, u kojem poriče sve induktivne sheme osim lokalnih, po svojoj prilici nije prihvatljiva, njeno upućivanje na pojedinačne lokalne kontekste zaista je promaklo učesnicima u savremenoj raspravi o indukciji. Drugim rečima, moguće je da pojedine induktivne sheme onako kako ih formulišu gorenavedene teorije indukcije važe, ali u ograničenim, specifičnim domenima. Nijedna od njih ne može s pravom pretendovati na univerzalno važenje. To se sasvim lepo vidi u slučaju *teorije učenja*, koja zaista uverljivo opisuje postupak induktivnog izvođenja hipoteza iz podataka u „sređenim“ ustanovljenim oblastima istraživanja, ali se uopšte ne vidi kako bi bila primenljiva na rasplamsale revolucionarne periode naučnih proboja.

Da bismo utvrdili kako izgleda induktivni postupak u revolucionarnim periodima, neophodno je da detaljno analiziramo jednu takvu

epizodu i u njoj identifikujemo obrasce i osnovne elemente induktivnog postupka. Upravo to ćemo učiniti u ostatku knjige na primeru kvantne revolucije.

### 1.3 Induktivno izvođenje hipoteza iz eksperimentalnih rezultata

*„Ne postavlja se samo pitanje kako razviti interpretacije iz eksperimentalnih činjenica, već isto toliko i pitanje načina na koji iz tih činjenica razvijamo naše nepotpune teorijske pojmove.“*

– Nils Bor<sup>6</sup>

Analiza induktivnog pristupa koju ću ponuditi rezultat je detaljnog proučavanja jedne od najbitnijih epizoda u modernoj istoriji fizike. Ukratko ću objasniti opšti okvir induktivnog postupka i pokazaću kako se njime objašnjava nastanak kvantne mehanike. Posebno ću istaći ulogu koju je pritom imao Borov pristup fizici. Stoga veći deo ove knjige predstavlja iscrpnu studiju jednog primera induktivnog procesa u nauci. Ovakav prikaz indukcije je možda ograničen jer se fokusira na jedan veoma specifičan kontekst u istoriji fizike, ali se njegova prednost sastoji u tome što je zasnovan na detaljnom proučavanju konkretnog i važnog slučaja. Konačno, jedan od načina testiranja adekvatnosti opštijih i formalnijih stanovišta o indukciji jeste njihovo slaganje baš sa takvom vrstom analize.

Razumevanje istorijskog i praktičnog konteksta određenog polja naučnog istraživanja ključno je za shvatanje induktivnog procesa koji to istraživanje pokreće. Zapravo, može se ispostaviti da adekvatnost teorija indukcije zavisi od konteksta; neki pristupi mogu odgovarajuće da pokriju jedan period razvoja određenog naučnog polja, a da budu potpuno neodgovarajući za druge periode razvoja istog tog

---

<sup>6</sup> Vidi Pais (1991), 192.

naučnog polja. Dugotrajni periodi istraživačke potrage za novim fenomenima, poput onog koji je doveo do pojave kvantne mehanike, tokom kojih tek nastaju eksperimentalne i teorijske osnove, značajno se razlikuju od perioda jednosmerne aktivnosti za koje su teorijske i empirijske osnove praktično već postavljene – npr. u modernoj fizici čestica u kojoj se istraživanje odvija u velikim sudaračima čestica. Visokoformalizovana i jednosmerna izvođenja iz rezultata dobijenih u modernim sudaračima čestica mogla bi da pripadaju induktivnom procesu onako kako je on shvaćen u *teoriji učenja*. Situacija se, međutim, drastično menja kada smo suočeni sa spletom veoma raznovrsnih eksperimentalnih aktivnosti i proliferacijom teorijskih pitanja, što se dešavalo u fizici kakva je bila prvih decenija 20. veka, koja je i dovela do razvoja kvantne mehanike. Možda bi bilo previše optimistično očekivati da jedno obuhvatno objašnjenje indukcije adekvatno rasvetli obe pomenute epizode. Ali kako bismo se uopšte bavili ovim opštijim pitanjima i gradili apstraktnije modele, važno je da prethodno formulišemo iskaze o induktivnom procesu u nauci u vezi s kontekstom koji se kreće „odozdo naviše“, od eksperimenata ka teoriji.

Pretežno empirijski fokus u filozofiji nauke nije uvek bio koristan u razumevanju finesa metodologije koja je pokretala eksperimentalni naučni rad (Boyd 2018). U nekim aspektima, takav fokus bio je jednako neupotrebljiv kao i „društveni konstruktivizam“. Kao što je Blur (Bloor 1991, 11–12) ispravno primetio, usredsređenost na proučavanje empirijskih metoda u nauci bila je posledica izdvajanja pojedinca kao sazajnog subjekta. Tako je empiristički nastrojena epistemologija nauke tradicionalno bila usmerena na naučnika kao pojedinca, njegove sazajne kapacitete i različite načine sticanja znanja. I zaista, pitanje kako jedan naučnik, sam, dolazi do otkrića i potvrđuje teorije jeste ključno ako želimo da razumemo kako funkcioniše nauka. U stvari, i sami naučnici smatraju da im ovaj prilično jednostavan, na pojedinca fokusiran induktivni proces, služi kao primarno metodološko oruđe. Poznati Platov rad „Inferencijalni lanac“ (Platt 1964) upravo je tu ulogu imao u nastavnom programu nauka u SAD.