ANαliZA

časopis za kritično misel

Letnik 3, številka 1, junij 1999 · ISSN 1408-2969

PREVOD IN KOMENTAR

Thomas S. Kuhn

Funkcija miselnih eksperimentov

prevedel Gorazd Andrejč

Citiranje: Thomas S. Kuhn, »Funkcija miselnih eksperimentov«, *Analiza: časopis za kritično misel* 3, št. 1 (1999): 79–97.

Prevod. Licenca Creative Commons, ki velja za arhiv revije, za prevode ne velja; pravice izvirnika pripadajo njegovim imetnikom.

Izdajatelj: Društvo za analitično filozofijo in filozofijo znanosti, Ljubljana.

Elektronska različica je bila leta 2026 rekonstruirana iz izvirnih stavnih datotek in preverjena s tiskano izdajo. Številke strani ustrezajo tiskani izdaji; prelomi strani znotraj prispevka se lahko nekoliko razlikujejo.

Thomas S. Kuhn
prevedel Gorazd Andrejč

FUNKCIJA MISELNIH EKSPERIMENTOV*

Miselni eksperimenti so več kot enkrat odigrali ključno vlogo v razvoju fizikalne znanosti. Vsaj zgodovinar mora priznati, da so le-ti občasno močna orodja za povečanje človekovega razumevanja narave. Kljub temu še zdaleč ni jasno, kako so sploh lahko imeli tolikšen pomen. Pogosto se ukvarjajo s situacijami – kot v primeru Einsteinovega vlaka, ki ga na obeh koncih zadene strela –, ki niso bile opazovane v laboratoriju.[1] Včasih – kot v primeru Bohr-Heisenbergovega mikroskopa – miselni eksperimenti terjajo situacije, ki jih ni mogoče v celoti preveriti in za katere sploh ni treba, da se pojavijo v naravi.[2] Takšno stanje stvari povzroča vrsto zmed; tri od teh bomo preučili v tem članku skozi razširjeno analizo enega primera. Noben posamezen miselni eksperiment pa seveda ne more sam zastopati vseh, ki so bili zgodovinsko pomembni. Kategorija "miselni eksperiment" je tako ali tako preširoka in preveč nejasna za kratek povzetek; mnogi miselni eksperimenti se razlikujejo od tega, ki ga obravnavamo tukaj. Toda ta posamezni primer, potegnjen iz Galilejevega dela, je zanimiv sam po sebi, njegova zanimivost pa se še poveča, ko opazimo očitno podobnost z določenimi miselnimi eksperimenti, ki so se izkazali za učinkovite v preoblikovanju fizike v dvajsetem stoletju. Menim, da je primer značilen predstavnik tega pomembnega razreda, čeprav tega ne bom dokazoval.

Glavne probleme, ki se pojavijo pri preučevanju miselnih eksperimentov, lahko oblikujemo kot niz vprašanj. Prvič, ker zamišljena situacija v miselnem eksperimentu očitno ne utegne biti arbitrarna, katerim pogojem verjetnosti mora biti podložna? V kakšnem smislu in v kolikšni meri mora biti zamišljena situacija takšne vrste, da je lahko predstavljena ali je bila predstavljena v naravi? Ta težava spet

---

** Prevedeno po Thomas S. Kuhn, "A Function of Thought Experiments", v I. Hacking (ur.), *Scientific Revolutions*, Oxford University Press, New York 1981, str. 7-27.

[1] Znameniti eksperiment z vlakom se je prvič pojavil v Einsteinovi popularizaciji relativnostne teorije *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (Gemeinverständlich)* (Braunschweig, 1916). V peti izdaji (1920), ki sem jo upošteval, je eksperiment opisan na straneh 14-19. Opozoriti je treba, da je ta miselni eksperiment le poenostavljena različica tistega, ki je uporabljen v Einsteinovem prvem članku o relativnosti "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik*, 17 (1905), str. 891-921. V izvirnem miselnem eksperimentu je uporabljen le en žarek; mesto drugega prevzema zrcalni odboj.

[2] W. Heisenberg "Über den anschaulichen Inhalt der quantenteorethischen Kinematik und Mechanik", *Zeitschrift für Physik*, 43 (1927), str. 172-98. N. Bohr "The Quantum postulate and the recent Development of Atomic Theory", *Atti Congreso Internazionale dei Fisici, 11-20 Settembre 1927*, vol. 2 (Bologna, 1928), str. 565-88. Argument se začne tako, da obravnava elektron kot klasični delec in preučuje njegov tir pred in po trku s fotonom, ki je uporabljen za določanje njegove lege ali hitrosti. Končni cilj je pokazati, da teh meritev ni mogoče izpeljati klasično in da je zato začeten opis predpostavljal več, kot kvantna mehanika dovoljuje. To kršenje kvantno mehaničnih načel pa vseeno ne zmanjšuje pomembnosti miselnega eksperimenta.

kaže na drugo: Če predpostavimo, da vsak uspešen miselni eksperiment vsebuje v svojem načrtu nekatere vnaprejšnje informacije o svetu, te informacije same v eksperimentu niso vprašljive. Nasprotno, če imamo opravka s pravim miselnim eksperimentom, morajo biti empirični podatki, na katerih sloni, tako dobro znani kot tudi splošno sprejeti, preden si miselni eksperiment sploh izmislimo. Kako nas lahko potem miselni eksperiment, ki sloni izključno na že poznanih podatkih, privede do novega znanja ali razumevanja narave? In končno – da tretje vprašanje zastavimo v najkrajši obliki izmed vseh treh –, kakšna vrsta znanja ali razumevanja lahko nastane na tak način? Na kaj (če sploh kaj) lahko znanstvenik upa, da se bo naučil iz miselnega eksperimenta?

Obstaja dokaj preprost niz odgovorov na ta vprašanja, ki ga bom dopolnil z ilustracijami iz zgodovine in psihologije v naslednjih dveh razdelkih. Tisti odgovori, ki so vsekakor pomembni, ne pa tudi – tako mislim – popolnoma pravilni, predlagajo, da novo razumevanje, ki je rezultat miselnih eksperimentov, ni razumevanje *narave*, temveč razumevanje znanstvenikovega *pojmovnega aparata*. Po tej analizi je funkcija miselnih eksperimentov ta, da pomagajo pri odstranitvi predhodne nejasnosti tako, da prisilijo znanstvenika k priznanju protislovij, ki so bila sestavni del njegovega razmišljanja že od vsega začetka. V nasprotju z odkritjem novega znanja se za odstranitev obstoječe zmede ne zdi, da bi to zahtevalo dodatne empirične podatke. Ni treba, da je zamišljena situacija tudi taka, ki v naravi dejansko obstaja. Nasprotno, miselni eksperiment, katerega edina naloga je, da odstrani nejasnost, je podvržen le enemu verjetnostnemu pogoju. Zamišljena situacija mora biti takšna, da znanstvenik lahko uporablja svoje pojme na enak način, kot jih je normalno uporabljal dotlej.

Prav zato, ker so ti odgovori zelo plavzibilni in ker so tesno povezani z filozofsko tradicijo, zahtevajo podroben in pozoren pregled. Ta pregled nam bo poleg tega zagotovil pomembna analitična sredstva. Kljub temu pa ti odgovori ne vključujejo pomembnih značilnosti zgodovinske situacije, znotraj katere delujejo miselni eksperimenti, zato bosta zadnja razdelka tega članka iskala odgovore nekoliko drugačne vrste. Predvsem v tretjem razdelku bom predlagal stališče, da je opisovati znanstvenikovo situacijo pred izvedbo ustreznega miselnega eksperimenta kot "protislovno" ali "zmedeno" v pomembnem smislu zavajajoče. Stvari se bolj približamo, če rečemo, da miselni eksperimenti pomagajo znanstveniku, da pride do zakonov in teorij, različnih od tistih, ki jih je zagovarjal prej. V tem primeru je lahko bilo prejšnje znanje "zmedeno" ali "protislovno" le v posebnem in v povsem nezgodovinskem smislu, ki bi pripisal zmedenost in protislovnost vsem zakonom in teorijam, ki jih je bila neka panoga zaradi znanstvenega napredka prisiljena opustiti. Ta opis seveda neogibno namiguje, da so posledice miselnega eksperimentiranja mnogo bolj podobne dejanskim eksperimentom, kot običajno mislimo, čeprav miselni eksperimenti ne predstavljajo novih podatkov. Zadnji razdelek bo poskusil predlagati, kako se to utegne primeriti.

Zgodovinski kontekst, znotraj katerega dejanski miselni eksperimenti pomagajo

pri preoblikovanju ali novi ureditvi obstoječih pojmov, je neizogibno zelo zapleten. Zato začenjam s preprostejšim, nezgodovinskim primerom, in izbiram v ta namen pojmovni prenos, ki ga je v laboratoriju sprožil izjemni švicarski otroški psiholog Jean Piaget. Upravičenje za to navidezno oddaljevanje od naše teme bo jasno v nadaljevanju. Piaget se je ukvarjal z otroki tako, da jih je izpostavil neki dejanski situaciji v laboratoriju in jim potem zastavljal vprašanja o njej. Pri nekoliko zrelejših osebkih bi lahko bili seveda dosegli enak učinek zgolj z vprašanji brez fizičnega prikazovanja. Če bi bila ta ista vprašanja samoproizvedena, bi imeli opravka s čisto miselno-eksperimentalno situacijo, kakršna bo predstavljena v naslednjem razdelku iz Galilejevega dela. Ker pa je poleg tega posamezen pojmovni prenos, ki ga povzroči Galilejev eksperiment, skoraj popolnoma enak kot pri Piagetu v laboratoriju, se lahko dosti naučimo, če začnemo z bolj elementarnim primerom.

Piaget je v svoji laboratorijski situaciji predstavil otrokom dva avtomobilčka različnih barv – enega rdečega in enega modrega.[3] Pri vsakem izpostavljanju eksperimentu sta se oba avtomobilčka uniformno premaknila v ravni črti. Včasih sta oba prešla enako razdaljo, toda v različnih časovnih intervalih. Ob drugih priložnostih je bil čas gibanja pri obeh enak, s tem da je en avto prepotoval večjo pot. Nekaj eksperimentov pa je bilo tudi takih, pri katerih niso bile niti poti niti časi povsem enaki. Po vsaki "dirki" je Piaget vprašal svoje osebke, kateri avto se je gibal hitreje in kako lahko to povejo.

Pri obravnavi odgovorov otrok sem se omejil na srednjo skupino otrok, dovolj starih, da so se iz eksperimenta lahko nekaj naučili, in dovolj mladih, da njihovi odgovori niso bili takšni kot pri odraslih. Ti otroci so v večini primerov za "hitrejšega" opisali tisti avto, ki je bil prvi na cilju ali pa je vodil večji del gibanja. Nadalje, otroci so še dalje uporabljali besedo na ta način, čeprav so prepoznali, da je "počasnejši" avto prešel večjo pot kot "hitrejši" v istem času. Poglejmo na primer situacijo, v kateri oba avta začneta iz iste točke, toda rdeči začne kasneje in dohiti modrega na cilju. Naslednji dialog – z odgovori otrok v kurzivi – je tipičen za situacijo: "Ali sta začela naenkrat?" – "*Ne. Modri je krenil prvi*." – "Ali sta prispela skupaj?" – "*Da*" – "Ali je bil kateri od njiju hitrejši, ali sta bila enako hitra?" – "*Modri je bil hitrejši*."[4] Ti odgovori kažejo tisto, kar bom zaradi enostavnosti imenoval merilo "doseganja cilja" za uporabo besede "hitrejši".

Če bi bilo doseganje cilja edino merilo, ki bi ga Piagetovi otroci uporabljali, jih sami eksperimenti ne bi mogli ničesar naučiti. Zaključili bi lahko, da je njihov pojem "hitrejši" različen od tistega, ki ga imajo odrasli; ker pa so ga uporabljali konsistentno, bi lahko verjetno le z vmešavanjem starševske ali pedagoške avtoritete dosegli spremembo. Ostali eksperimenti seveda razkrivajo eksistenco še drugega merila; to bi nam lahko pokazal še celo pravkar opisani eksperiment. Skoraj takoj

[3] J. Piaget, *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant* (Paris, 1946), še posebej 6. in 7. poglavje. Spodaj opisani eksperimenti so iz zadnjega poglavja.

[4] *Ravno tam*, str. 160, avtorjev prevod.

za zgoraj opisanim eksperimentom je bil aparat nastavljen tako, da je rdeč avto krenil zelo pozno in se je moral gibati zelo hitro, da je ujel modrega na cilju. V tem primeru se je pogovor z istim otrokom odvijal takole: "Je bil kateri od njiju hitrejši od drugega?" – "*Rdeči*." – "Kako si to ugotovil?" – "*GLEDAL SEM GA*."[5] Zdi se, da lahko v primeru dovolj hitrih gibanj otroci to neposredno zaznajo. (Primerjaj način, kako odrasli "vidijo" premikanje sekundnega kazalca na uri z načinom, kako opazijo spremembo lege pri minutnem kazalcu.) Včasih otroci pri identificiranju hitrejšega avtomobilčka uporabijo neposredno zaznavo gibanja. Zaradi pomanjkanja boljše besede bom to merilo imenoval "zaznavna nejasnost".

Hkraten obstoj teh dveh meril, merila doseganja cilja in merila zaznavne nejasnosti, omogoča otrokom, da se v Piagetovem laboratoriju nekaj naučijo. Tudi brez laboratorija bi jih narava prej ali slej naučila istega nauka kot v primeru starejših otrok iz Piagetove skupine. Ne zelo pogosto (sicer otroci ne bi mogli ohraniti pojma tako dolgo), ampak občasno, bo narava le predstavila situacijo, v kateri telo z manjšo neposredno zaznavno hitrostjo kljub temu doseže cilj prvo. V tem primeru si ključa oporekata: to otroka lahko pripelje do tega, da za obe telesi trdi, da sta "hitrejši", ali da sta obe "počasnejši", ali pa da je isto telo "počasnejše" in "hitrejše" hkrati. Izkušnja paradoksa, ki jo je Piaget ustvaril v laboratoriju, je občasno dala osupljive rezultate. Če so bili otroci izpostavljeni enemu samemu paradoksnemu eksperimentu, so najprej trdili za prvo telo, da je "hitrejše", takoj zatem pa so isto trdili za drugo telo. Njihovi odgovori so postali kritično odvisni od malenkostnih razlik v ureditvi eksperimenta ter od besedila vprašanj. Na koncu, ko so se zavedli očitno naključnih oscilacij njihovih odzivov, so najpametnejši in najbolj pripravljeni otroci odkrili ali izumili odrasli pojem "hitrejši". Z nekaj vaje so ga nekateri uporabljali konsistentno tudi še naprej. To so otroci, ki so se iz eksperimentov v Piagetovem laboratoriju nekaj naučili.

Če se torej vrnemo k nizu vprašanj, ki nas je motiviral za to raziskovanje: Kaj bomo rekli, da so se otroci naučili in iz česa so se to naučili? Za sedaj se bom omejil na minimalen in dokaj tradicionalen niz odgovorov, ki bodo zagotovili izhodišče za naslednji razdelek. Ker je vseboval dve neodvisni merili za uporabo pojmovnega odnosa "hitrejši", je mentalni aparat, ki so ga Piagetovi otroci prinesli v laboratorij, vseboval implicitno protislovje. V laboratoriju je vpliv nove situacije, vključno z izpostavljanjem eksperimentu in izpraševanju, otroke prisilil, da so se tega protislovja ovedli. Kot rezultat so nekateri otroci spremenili svoj pojem "hitrejši", morda tako, da so ga razcepili. Izvirni pojem se je razdelil v nekaj, kar je podobno pojmu "hitrejši" pri odraslih, in v ločen pojem "doseganje cilja kot prvi". Pojmovni aparat otrok je postal tako verjetno bogatejši in vsekakor primernejši. Naučili so se izogniti precejšnji pojmovni napaki in se tako naučili misliti razločneje.

[5] *Ravno tam*, str. 161, avtorjev poudarek. V tem odlomku sem "plus fort" prevedel kot *bolj hitro*; v prejšnjem odlomku je bilo v francoščini "plus vite" Vendar pa sami eksperimenti nakazujejo, da sta v tem kontekstu, čeprav morda ne v vseh, odgovora na vprašanji "plos fort?" in "plus vite?" enaka.

Ti odgovori nam, spet, nudijo tudi druge, ker kažejo na edini pogoj, ki ga mora izpolnjevati Piagetova eksperimentalna situacija, da bi dosegla pedagoški cilj. Jasno je, da te situacije ne morejo biti naključne. Psiholog bi lahko iz nekih povsem drugih razlogov vprašal otroka, ali je hitrejše drevo ali zelje; najverjetneje bi tudi dobil odgovor,[6] ampak otrok se ne bi naučil razločneje razmišljati. Če naj bi se tega naučil, mora biti njemu predstavljena situacija vsaj relevantna. To pomeni, da mora kazati ključe, ki jih otrok običajno uporablja, ko oblikuje sodbe o relativni hitrosti. Po drugi strani pa velja naslednje: čeprav morajo biti ključi normalni, za celotno situacijo to ni potrebno. Če bi otroku prikazali risanko s paradoksnimi gibanji, bi otrok prišel do enakih sklepov o svojih pojmih, čeprav v sami naravi vlada zakon, da hitrejša telesa vedno prva dosežejo cilj. Torej pogoja fizične verjetnosti ni. Eksperimentator si lahko zamišlja katerokoli situacijo, dokler mu le-ta dovoljuje uporabo normalnih ključev.

Poglejmo sedaj zgodovinski – vendar sicer podoben – primer pojmovnega popravka, ki je spet predstavljen s podrobno analizo zamišljene situacije. Tako kot otroci iz Piagetovega laboratorija tudi Aristotelova *Fizika* in tradicija, ki iz nje izhaja, kažeta na uporabo dveh različnih meril v razpravah o hitrosti. Splošna poanta je dobro znana, vendar jo moramo tukaj izločiti, da bi jo poudarili. V večini primerov Aristotel obravnava gibanje ali spremembo (ta dva termina sta ponavadi v njegovi fiziki zamenljiva) kot spremembo stanja. Torej "vsaka sprememba je *iz* nečesa v nekaj, kot že nakazuje sama beseda *metabole*".[7] Aristotelovo nenehno ponavljanje takšnih trditev nakazuje, da on normalno gleda na kakršnokoli gibanje, ki ni nebesno, kot na končen in dokončan dogodek, ki ga je treba doumeti kot celoto. Temu ustrezno meri razdaljo in hitrost gibanja v okviru parametrov, ki opisujejo mejne točke tega gibanja, s *termini a quo* in *ad quem* srednjeveške fizike.

Posledice Aristotelovega pojma hitrosti so takojšnje in očitne. Kot pravi sam: "Hitrejša od dveh stvari preide večjo razdaljo v enakem času, enako razdaljo v manjšem času in večjo razdaljo v manjšem času."[8] In drugje pravi: "Enaka hitrost je, kjer je *ista* sprememba dosežena v enakem času."[9] V teh odlomkih kot tudi v mnogih drugih delih Aristotelovih spisov je impliciten pojem hitrosti zelo podoben tistemu, čemur bi mi rekli "povprečna hitrost": količina, ki jo enačimo z razmerjem med celotno razdaljo in celotnim pretečenim časom. Tako kot otrokovo merilo doseganja cilja se tudi ta način presojanja hitrosti razlikuje od našega. Ampak tudi v tem primeru razlika ne more škodovati, dokler je merilo povprečne hitrosti uporabljeno konsistentno.

In tako kot Piagetovi otroci tudi Aristotel – gledano z modernega stališča – ni po-

[6] Prav takšna vprašanja je uporabil Charles E. Osgood, da bi dobil to, kar imenuje "semantični profil" raznih besed. Glej njegovo knjigo *Measurement of Meaning* (Urbana, III., 1957).

[7] Aristotel, *Physica*, prev. R. P. Hardie in R. K. Gaye, v *The Works of Aristotle*, vol. 2 (Oxford, 1930), 224b35-225a1.

[8] *Ravno tam*, 232a25-27.

[9] *Ravno tam*, 249b4-5.

vsod povsem konsistenten. Zdi se, da ima tudi on za presojanje hitrosti merilo, ki je podobno otrokovi zaznavni nejasnosti. Bolj natančno: Aristotel občasno razločuje med hitrostjo telesa na začetku in na koncu gibanja. Na primer: pri razločevanju med naravnimi ali nevsiljenimi gibanji, ki se končujejo z mirovanjem, ter vsiljenimi gibanji, ki zahtevajo zunanjega gibalca, trdi: "Ampak medtem, ko hitrost tistega, ki se na koncu ustavi, vedno narašča, hitrost tistega, ki je giban na silo, vedno pojema."[10] V tem kot tudi v nekaterih podobnih odlomkih ni nobene omembe mejnih točk, prepotovane razdalje ali pretečenega časa. Namesto tega Aristotel neposredno dojema – in to morda zaznavno – vidik gibanja, ki bi ga morali opisati kot "trenutno hitrost" in ki ima precej drugačne lastnosti od povprečne hitrosti. Aristotel pa takšnega razločka ne naredi. Kot bomo videli kasneje, so dejansko zelo pomembni vidiki njegove fizike pogojeni prav s to njegovo nesposobnostjo razločevanja. Kot rezultat so lahko tisti, ki uporabljajo aristotelski pojem hitrosti, soočeni s precej podobnimi paradoksi, s kakršnimi je Piaget soočil svoje otroke.

Takoj bomo preučili miselni eksperiment, ki ga je Galilei uporabil, da je pokazal očitnost teh paradoksov, vendar moramo najprej omeniti, da v Galilejevem času pojem hitrosti ni bil več povsem tak, kot ga je zapustil Aristotel. Dobro znane analitične tehnike, ki so jih razvili v 14. stoletju, da bi preučevali širino oblik, so obogatile pojmovni aparat, ki je bil na voljo preučevalcem gibanja. Še posebej, uvedle so razlikovanje med totalno hitrostjo gibanja na eni strani ter intenziteto hitrosti v vsakem trenutku gibanja na drugi. Slednji od teh pojmov je bil zelo blizu modernemu pojmu trenutne hitrosti, prvi pa je bil – čeravno šele po nekaterih pomembnih Galilejevih popravkih – dolg korak stran k modernemu pojmu povprečne hitrosti.[11] Del impliciranega paradoksa v aristotelskem pojmu hitrosti je bil odstranjen v srednjem veku, dve stoletji in pol pred Galilejevim pisanjem.

To srednjeveško preoblikovanje pojmov pa je bilo seveda nepopolno v enem pomembnem pogledu. Širina oblik se je lahko uporabljala za primerjavo dveh različnih gibanj le takrat, če sta obe imeli enako "ekstenzijo" – to je takrat, če sta prešli enako razdaljo ali porabili enako časa. Richarda Swinesheada formulacija mertonianskega načela bi morala rabiti za to, da naredi to prepogosto zanemarjeno omejitev očitno: Če bi bil prirastek hitrosti dosežen enakomerno, potem "bi s pomočjo tega prirastka bila prepotovana tolikšna razdalja ..., kot bi bila s pomočjo srednje vrednosti [ali intenzitete hitrosti] tega prirastka, če predpostavimo, da bi se telo gibalo s to srednjo vrednostjo [hitrosti] skozi celoten čas".[12] Tukaj mora biti pretečen čas pri obeh gibanjih enak ali pa se tehnika primerjave podre. Če bi pretečena časa lahko bila različna, potem bi lahko enakomerno gibanje majhne intenzitete, a dolgega trajanja, imelo večjo totalno hitrost kot gibanje z večjo intenziteto (z večjo trenutno hitrostjo), ki bi trajalo le kratek čas. Srednjeveški analitiki

[10] *Ravno tam*, 230b23-25.

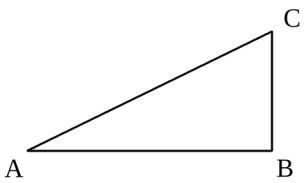
[11] O podrobni razpravi o celotnem vprašanju glede širine oblik glej Marshall Claget, *The Science of Mechanics in the Middle Ages* (Madison, Wis., 1959), drugi del.

[12] *Ravno tam*, str. 290.

gibanja so se na splošno izognili tem potencialnim težavam tako, da so omejili svojo pozornost na primerjave, ki so jih njihove tehnike lahko obvladovale. Galilei pa je seveda zahteval bolj splošno tehniko, pri njenem razvoju (ali vsaj, ko jo je poučeval druge) pa je uporabil miselni eksperiment, ki je prinesel v ospredje celoten aristotelski paradoks.

Imamo dve zagotovili, da je bila težava še vedno zelo realna v prvi tretjini sedemnajstega stoletja. Prvo je Galilejeva pedagoška natančnost – njegov tekst je bil usmerjen k resničnim problemom. Morda še bolj impresivno pa je dejstvo, da se Galilei sam ni vedno uspel izogniti težavam.[13]

Ustrezni eksperiment se nahaja skoraj na samem začetku "Prvega dne" Galilejevega *Dialoga o dveh glavnih svetovnih sistemih*.[14] Salviati, ki govori v Galilejevem imenu, zaprosi svoja sogovornika, naj si zamislita dve ravini: *CB* vertikalno in *CA* nagnjeno, dvignjeni v enaki vertikalni razdalji nad horizontalno ravnino *AB*. Da bi pomagal domišljiji, Salviati vključi skico, ki je podobna naslednji skici:



Dalje si predstavljajmo dve telesi, ki drsita ali pa se kotalita brez trenja po obeh ravninah iz skupne začetne točke *C*. Naposled Salviati pozove sogovornika k priznanju dejstva, da – ko bosta drseči telesi dosegli točki *A* in *B* – bosta dosegli enak zagon ali hitrost, hitrost, ki je potrebna, da bi ju ponesla spet nazaj na vertikalno višino, iz katere sta krenila.[15] Tudi ta prošnja je uslišana, tako da Salviati nadaljuje z zastavljanjem vprašanja udeležencema v dialogu: Katero od dveh teles se giblje hitreje? Njegov cilj je, da spoznata, da sta lahko prisiljena dopustiti, da je gibanje po navpični – uporabljajoč tedaj aktualen pojem hitrosti – obenem hitrejše, enako hitro in tudi počasnejše od gibanja po klancu. Njegov nadaljnji cilj pa je, da sogovornika in bralci – s pomočjo vpliva tega paradoksa – spoznajo, da hitrosti ne bi smeli pripisovati celotnemu gibanju, ampak njegovim delom. Na kratko: miselni eksperiment je, kot kaže sam Galilei, uvod v celotno razpravo o enakomernem in pospešenem gibanju, ki se pojavlja v "Tretjem razgovoru" njegovih *Dveh novih znanosti*. Sam argument bom občutno strnil in sistematiziral, ker nas detajl-

[13] Najpomembnejši spodrsljaj te vrste najdemo v "Drugem dnevu" Galilejevega *Dialoga o dveh glavnih svetovnih sistemih* (glej angleški prevod Stillmana Drakea [Berkeley, 1953], str. 199-201). Galilei dokazuje, da nobeno materialno telo, pa če je še tako lahko, ne bo vrženo iz vrteče se zemlje, četudi bi se zemlja vrtela mnogo hitreje, kot se vrti sedaj. Ta rezultat (ki ga Galilejev sistem namreč zahteva – njegov spodrsljaj, čeravno nenameren, ni brez osnove) je dobljen tako, da se končna hitrost enakomerno pospešenega gibanja obravnava tako, kot da bi bila sorazmerna prepotovani razdalji. To sorazmerje je seveda neposredna posledica mertonianskega načela, uporabno pa je le pri gibanjih, ki zahtevajo enak čas. Preučiti bi morali tudi Drakeovi opazki o tem odlomku, ker nudita nekoliko drugačno interpretacijo.

[14] *Ravo tam*, str. 22-27.

[15] Galilei se tega priznanja poslužuje nekoliko manj, kot se ga jaz v nadaljevanju članka. Strogo gledano, njegov argument od tega priznanja ni odvisen, če ravnino *CA* lahko podaljšamo preko *A* in če telo, ki se kotali po podaljšani ravnini, še naprej pridobiva na hitrosti. Zaradi enostavnosti bom svoj sistematiziran povzetek omejil na nepodaljšano ravnino ter sledil vodilu, ki ga Galilei nudi v prvem delu svojega besedila.

na izmenjava misli v dialogu ne zanima. Ko sta sogovornika prvič vprašana, katero telo je hitrejše, odgovorita tako, kot bi vsi odgovorili, čeprav bi fiziki med nami to morali bolje vedeti. Trdita, da je gibanje po navpičnici očitno hitrejše.[16] Tukaj se dve od treh meril, na katera smo že naleteli, kombinirata. Medtem ko sta obe telesi v gibanju, je telo, ki se giblje po navpičnici, "bolj nejasno". Poleg tega pa je tudi tisto, ki prvo doseže cilj.

Ta očiten in zelo sprejemljiv odgovor pa takoj povzroči težave, ki jih prvi prepozna pametnejši izmed sogovornikov, Sagredo. Pokaže (ali pa je blizu tega – ta del argumenta predstavljam nekoliko bolj povezano, kot je v izvirniku), da je odgovor nezdružljiv z začetnim priznanjem. Ker se obe telesi začneta gibati iz mirovanja in ker pridobita enako končno hitrost, morata imeti enako povprečno hitrost. Kako je potem lahko eno hitrejše kot drugo? V tem trenutku Salviati spet poseže v razpravo in spomni poslušalce, da je hitrejše od dveh gibanj ponavadi definirano kot tisto, ki prepotuje enako razdaljo v krajšem času. Predlaga, da del težave vznikne iz poskusa, da bi primerjali dve gibanji, ki prepotujeta različne razdalje. Namesto tega, poudari Salviati, bi udeleženci dialoga morali primerjati čase, ki so potrebni, da telesi prepotujeta skupno standardno razdaljo. Kot standard izbere dolžino vertikalne ravnine *CB*.

To pa problem seveda le poslabša. *CA* je daljša od *CB*, in odgovor na vprašanje, katero telo se giblje hitreje, postane kritično odvisen od tega, kje na klancu *CA* izmerimo standardno dolžino *CB*. Če jo izmerimo iz vrha navzdol, bo telo, ki se giblje po navpičnici, končalo gibanje v krajšem času, kot ga potrebuje telo na klancu, da prepotuje razdaljo, ki je enaka *CB*. Gibanje po navpičnici je torej hitrejše. Po drugi strani pa, če izmerimo standardno razdaljo od konca klanca navzgor, bo telo, ki se giblje navpično, potrebovalo več časa, da opravi svoje gibanje, kot ga bo potrebovalo telo na klancu, da prepotuje enako standardno razdaljo. Gibanje po navpičnici je zato počasnejše. Končno, trdi Salviati, če je razdalja *CB* izmerjena na primernem notranjem delu klanca, bosta časa, ki sta potrebna, da obe telesi prepotujeta enak standardni del poti, enaka. Gibanje po navpičnici ima enako hitrost kot gibanje po klancu. Na tej točki nam je dialog ponudil tri odgovore na eno vprašanje glede ene situacije, ki so vsak z vsakim nezdružljivi.

Rezultat je seveda paradoks; to pa je način (ali eden od načinov), s katerim je Galilei pripravil svoje sodobnike na spremembo pojmov, uporabljenih v razpravi, analiziranju ali eksperimentiranju o gibanju. Čeprav nova pojma nista bila do popolnosti razvita za javnost vse do objave *Dveh novih znanosti*, nam *Dialog* že nakazuje, kam je argument usmerjen. "Hitreje" in "hitrost" se ne smeta uporabljati na tradicionalen način. Lahko rečemo, da ima v določenem trenutku neko telo večjo hitrost kot drugo telo ob istem času ali v drugem določenem trenutku. Lahko tudi rečemo, da določeno telo prepotuje neko razdaljo hitreje, kot prepotuje

[16] Tisti, ki dvomi, da je to zelo mikaven in naraven odgovor, naj poskusi z Galilejevim vprašanjem pri študentih fizike, kot sem to poskusil sam. Mnogi dajo enak odgovor kot Salviatijeva sogovornika, če jim le prej ne povemo, kaj bo sledilo.

isto (ali neko drugo) razdaljo kako drugo telo. Toda ti dve vrsti trditve ne opisujeta enake lastnosti gibanja. Pojem "hitreje" pomeni – po eni strani – eno stvar, ko je uporabljen za primerjavo začetnih velikosti hitrosti v določenem trenutku, in drugo takrat, ko primerjamo čase, ki so potrebni za dopolnitev dveh različnih gibanj. Telo je lahko "hitrejše" v enem smislu in "počasnejše" v drugem.

Ravno ta pojmovna reforma je tisto, o čemer nas je pomagal poučiti Galilejev miselni eksperiment, zato si lahko sedaj zastavimo naša stara vprašanja o njem. Očitno so minimalni odgovori enaki tistim, ki smo jih dobili, ko smo obravnavali rezultate Piagetovih eksperimentov. Pojmi, ki jih je Aristotel uporabljal pri preučevanju gibanja, so bili do neke mere protislovni in ta protislovnost v srednjem veku ni bila v celoti odstranjena. Galilejev miselni eksperiment je postavil težave v ospredje tako, da je bralce soočil s paradoksom, ki je bil impliciten v njihovem načinu razmišljanja. Rezultat tega je bil, da jim je to pomagalo spremeniti njihov pojmovni aparat.

Če je vse to tako, potem lahko vidimo merilo verjetnosti, kateremu je moral ustrezati miselni eksperiment. Za Galilejev argument ni pomembno, če se telesi dejansko gibljeta enakomerno pospešeno, medtem ko se gibljeta po navpičnici in po klancu. Niti ni pomembno to, ali telesi dejansko prispeta na konec z enako trenutno hitrostjo, če sta višini obeh ravnin enaki. Galilei se ne trudi z dokazovanjem katerekoli od teh točk. Za njegov namen v tem delu *Dialoga* je povsem dovolj, da le lahko predpostavimo, da te stvari veljajo. Po drugi strani pa iz tega ne sledi, da bi Galilejeva izbira miselnoeksperimentalne situacije lahko bila arbitrarna. On ne bi mogel koristno predlagati, na primer, situacije, v kateri bi telo izginilo na začetku svojega gibanja pri *C* in se kmalu po tem ponovno pojavilo v točki *A*, ne da bi prepotovalo to razdaljo. Takšen eksperiment bi ilustriral omejitve pri uporabi pojma "hitrejši", toda – vsaj do priznanja kvantnih skokov – te omejitve ne bi bile informativne. Iz njih se ne bi mogli niti mi niti Galilejevi bralci ničesar naučiti o tradicionalno uporabljenih pojmih. Ti pojmi niso nikoli bili namenjeni za uporabo v takem primeru. Skratka, če naj bi bili tovrstni miselni eksperimenti učinkoviti, morajo tistim, ki jih izvajajo ali preučujejo, dopustiti, da uporabljajo pojme na enak način, kot so bili uporabljeni prej. Le če je temu pogoju zadoščeno, lahko miselni eksperiment sooči publiko z nepričakovanimi posledicami njenih običajnih pojmovnih operacij.

Do te točke je ključne dele mojega argumenta pogojevalo tisto, kar štejem za tradicionalno filozofsko pozicijo v analizi znanstvene misli vsaj od sedemnajstega stoletja dalje. Da bi bil miselni eksperiment učinkovit, mora, kot smo že videli, predstavljati normalno situacijo, to je situacijo, za katero se človek, ki analizira eksperiment, čuti zadostno opremljenega s predhodnimi izkustvi, da jo obvlada. V zamišljeni situaciji ne sme biti ničesar, kar je popolnoma neznano in nenavadno. Če je torej eksperiment odvisen – kot mora biti – od predhodnih izkustev narave, morajo biti ta izkustva v splošnem znana, še preden se lotimo eksperimenta. Zdelo se je, da je ta vidik miselnoeksperimentalne situacije narekoval enega izmed

sklepov, ki sem jih do sedaj konsistentno izpeljal. Ker miselni eksperiment ne izraža novih informacij o svetu, nas ne more naučiti ničesar, kar ni bilo znano že prej. Ali drugače: ne more nas naučiti ničesar o svetu. Namesto tega uči znanstvenika o njegovem pojmovnem aparatu. Njegova funkcija je omejena na popravke prejšnjih pojmovnih napak.

Seveda sumim, da utegnejo nekateri zgodovinarji znanosti čutiti nelagodje ob tem sklepu in predlagam, da bi ga drugi tudi morali čutiti. Nekako preveč spominja na znano pozicijo, ki obravnava ptolomejsko teorijo, flogistonsko teorijo ter kalorično teorijo zgolj kot napake, zmede ali dogmatizme, ki bi se jim liberalnejša ali inteligentnejša znanost izognila že od začetka. V atmosferi sodobnega zgodovinopisja postajajo takšna vrednotenja vedno manj plavzibilna, to isto ozračje neplavzibilnosti pa zastruplja tudi sklep, ki sem ga do sedaj izpeljal v tem članku. Čeprav Aristotel ni bil eksperimentalni fizik, je bil odličen logik. Ali bi pri tako osnovni zadevi svoje fizike lahko naredil takšno osnovno napako, kot smo mu jo pripisali? In če jo je naredil: ali bi lahko njegovi nasledniki domala dve tisočletji še naprej delali enako osnovno napako? Ali je logična zmeda res vse, za kar tukaj gre? Ali je lahko funkcija miselnih eksperimentov tako trivialna, kot nakazuje to celotno gledišče? Prepričan sem, da je odgovor na vsa ta vprašanja nikalen in da je koren težave v predpostavki, da nas miselni eksperimenti ne morejo ničesar naučiti o svetu zato, ker slonijo le na dobro poznanih podatkih. Čeprav sodoben epistemološki besedni zaklad ne daje zares uporabnih izrazov, bi sedaj rad pokazal, da se večina ljudi iz miselnih eksperimentov nauči nekaj o obojem: njihovih pojmih in o svetu. Z učenjem o pojmu hitrosti se Galilejevi bralci naučijo prav tako nekaj o tem, kako se telesa gibljejo. To, kar se jim zgodi, je zelo podobno tistemu, kar se zgodi človeku, kot je Lavoisier, ki mora prilagoditi rezultat novega nepričakovanega eksperimentalnega odkritja.[17]

Ko se lotevam teh nizov osrednjih točk, najprej zastavljam vprašanje: Kaj bi lahko bilo mišljeno z našim opisom otrokovega pojma "hitrejšega" in aristotelskega pojma hitrosti kot "samoprotislovnega" ali "zmedenega"? "Samoprotisloven" najmanj predlaga, da so ti pojmi podobni logikovemu slavnemu primeru kvadratnega kroga; ampak to ni čisto tako. Kvadratni krog je samoprotisloven v smislu, da ne bi mogel biti uprimerjen v nobenem možnem svetu. Ne moremo si niti zamisliti predmeta, ki bi izkazoval zahtevane kvalitete. Niti otrokov niti Aristotelov pojem seveda nista protislovna v tem smislu. Otrokov pojem "hitrejši" je vedno znova uprimerjen v našem svetu; protislovje se pojavi le takrat, kadar je otrok soočen s tako relativno redko vrsto gibanja, pri kateri zaznavno *bolj* "nejasen" predmet *zaostane* pri doseganju cilja. Aristotelov pojem hitrosti lahko, z njegovima dvema hkratnima meriloma, brez težav uporabimo pri večini gibanj, ki jih vidimo okrog nas. Problem se pojavi le pri tistem razredu gibanj, tudi precej redkem, pri katerem merilo trenutne hitrosti in merilo povprečne hitrosti vodita do protislovnih

[17] Ta pripomba predpostavlja analizo načina pojavljanja novih odkritij; o tem glej moj članek "The Historical Structure of Scientific Discovery", *Science*, 136 (1962), str. 760-764 in mojo knjigo *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago University Press, Chicago 1977.

odgovorov v kvalitativnih aplikacijah. Pri obeh primerih sta pojma protislovna le v smislu, da posameznik, ki ju uporablja, *tvega*, da bo zašel v protislovje sam s sabo. To pomeni, da se lahko znajde v situaciji, kjer bo prisiljen dati nezdružljive odgovore na eno in isto vprašanje.

To pa seveda ni tisto, kar običajno mislimo, kadar nekemu pojmu pripišemo izraz "protisloven". Vendar pa to seveda utegne biti tisto, kar imamo v mislih, ko opisujemo zgoraj preučevane pojme kot "zmedene" ali "neprimerne za jasno razmišljanje". Vsekakor ti izrazi bolje ustrezajo situaciji. Vseeno pa implicirajo nek standard jasnosti in primernosti, katerega morda nimamo pravice uporabljati. Ali bi od naših pojmov morali zahtevati, da naj bodo uporabni v katerikoli in vsaki situaciji, ki se lahko domnevno pojavi v kateremkoli možnem svetu, česar pa ne počnemo in ne bi mogli početi z našimi zakoni in teorijami? Ali ni dovolj, da od pojma zahtevamo – kot to počnemo z zakonom in teorijo –, da ga je mogoče nedvoumno uporabiti v vsaki situaciji, za katero pričakujemo, da bomo nanjo kdajkoli naleteli?

Da bi razumeli relevantnost teh vprašanj, si zamislimo svet, v katerem so vsa gibanja enake hitrosti. (Ta pogoj je strožji, kot je potrebno, ampak bo naredil argument jasnejši. Potreben šibkejši pogoj je, da nobeno "počasnejše" telo nikoli ne prehiti "hitrejšega". Gibanja, ki zadoščajo omenjenemu šibkejšemu pogoju, bom imenoval "kvazienakomerna".) V takšnem svetu Aristotelovega pojma hitrosti nikoli ne bi mogla ogroziti nobena fizikalna situacija, ker bi bili trenutna in povprečna hitrost vsakega gibanja vedno enaki.[18] Kaj bi potem lahko rekli, če bi v tem imaginarnem svetu našli znanstvenika, ki konsistentno uporablja aristotelski pojem hitrosti? Menim, da ne bi mogli trditi, da je zmeden. Zaradi njegove uporabe pojma ne bi moglo biti nič narobe z njegovo znanostjo ali logiko. Namesto tega bi verjetno – glede na naša širša izkustva in na naš ustrezno bogatejši pojmovni aparat – lahko rekli, da je – zavedno ali nezavedno – v svoj pojem hitrosti vključil svoje pričakovanje, da se bodo v njegovem svetu pojavljala le enakomerna gibanja. Sklenili bi, da je njegov pojem delno deloval kot zakon narave, kot zakon, ki mu je bilo regularno zadoščeno v njegovem svetu, v našem svetu pa bi mu bilo zadoščeno le priložnostno.

V Aristotelovem primeru seveda ne moremo trditi toliko. On je vedel in občasno tudi priznal, da, na primer, padajočim telesom hitrost narašča, medtem ko padajo. Po drugi strani pa obstajajo močni dokazi, da je Aristotel držal to informacijo na samem obrobju svoje znanstvene zavesti. Kadarkoli je bilo mogoče, in to je bilo pogosto, je obravnaval gibanja, kot da bi bila enakomerna ali pa kot takšna, ki imajo lastnosti enakomernega gibanja, rezultati tega pa so bili pomembni za velik del njegove fizike. V prejšnjem razdelku smo, na primer, obravnavali odlomek iz

[18] Lahko bi si tudi zamislili svet, v katerem merili, ki so ju uporabljali Piagetovi otroci, ne bi nikoli vodili do protislovja. Toda ta svet je bolj zapleten in ga zato ne bom uporabil v argumentu, ki sledi. Naj pa vseeno poskusim ugibati o naravi gibanja v takšnem svetu. Če ne bi posnemali starejših, bi bili otroci, ki bi dojemali gibanje na zgoraj omenjen način, sorazmerno neobčutljivi na pomembnost neuspeha pri zmagi na dirki. Namesto tega bi se moralo zdeti, da je vse odvisno od sile, s katero se gibljejo roke in noge.

Fizike, ki nam podaja definicijo "hitrejšega gibanja": "Hitrejša od dveh stvari prepotuje večjo razdaljo v enakem času, enako razdaljo v manjšem času in večjo razdaljo v manjšem času." Primerjajmo to z odlomkom, ki sledi takoj za tem: "Predpostavimo, da je A hitrejša od B. In zdaj: ker je tista od obeh stvari, ki prestane spremembo prej, hitrejša, zato v času FG, v katerem je A prestala spremembo od C do D, B še ne bo prispela do D, ampak ji bo do tega še manjkalo."[19] Ta trditev ni več prava definicija. Namesto tega govori o fizikalnem obnašanju "hitrejših" teles in kot taka velja le za telesa, ki se gibljejo enakomerno ali kvazienakomerno.[20] Celotna teža Galilejevega miselnega eksperimenta je, da pokaže, da ta izjava in druge, njej podobne – izjave, za katere se zdi, da nujno sledijo iz edine definicije, ki jo tradicionalni pojem "hitrejše" podpira –, ne držijo v svetu, kot ga poznamo, in da pojem zato potrebuje popravek. Aristotel namreč kljub temu še naprej vgrajuje svoje pojmovanje gibanja kot kvazienakomernega globoko v zgradbo svojega sistema. Na primer, v odstavku, ki sledi tistemu, iz katerega smo vzeli zgornje trditve, Aristotel uporablja te trditve, da bi pokazal, da prostor mora biti zvezen, če je čas zvezen. Njegov argument je odvisen od domneve, ki je implicirana zgoraj: Če telo B zaostaja za drugim telesom A ob koncu gibanja, je moralo zaostajati v vseh vmesnih točkah. V tem primeru lahko B uporabimo za razdelitev prostora in A za razdelitev časa. Če je eno zvezno, mora biti tudi drugo.[21] Na žalost pa domneva ne drži v primeru, kadar počasno telo pojema in ko hitrejše pospešuje. Ampak Aristotel ne uvidi potrebe po omejitvi glede tovrstnih gibanj. Tudi tukaj je njegov argument odvisen od njegovega pripisovanja kvalitativne lastnosti enakomerne spremembe vsem gibanjem.

Enak pogled na gibanje leži tudi v argumentu, s katerim Aristotel razvije svoje tako imenovane kvantitativne zakone gibanja.[22] Za ilustracijo poglejmo le odvisnost prepotovane razdalje od velikosti telesa in od pretečenega časa: "Če je sila A premaknila telo B za razdaljo C v času D, potem bo v enakem času enaka sila A premaknila polovico telesa B za dvakratno razdaljo C in v polovici časa D bo premaknila polovico telesa B za celo razdaljo C; zato opazimo pravila sorazmernosti."[23] Če sta torej podana sila in medij, se bo prepotovana razdalja spreminjala skupaj s časom in v obratnem sorazmerju z velikostjo telesa.

Modernim ušesom je to nedvomno čuden zakon, čeprav ne tako čuden, kot se je

[19] Aristotel, *Works* 2, 232a28-31.

[20] Prvi odlomek seveda dejansko ne more biti definicija. Vsak od treh pogojev, ki so tam navedeni, bi lahko imel to funkcijo, toda če jih vzamemo kot ekvivalentne, kot jih Aristotel, imajo enake fizikalne implikacije, kot jih sam ponazorim iz drugega odlomka.

[21] Aristotel, *Works* 2, 232b21-233a13.

[22] Ti zakoni so vedno opisani kot "kvantitativni" in tudi jaz se ravnam po tej rabi. Ampak težko je verjeti, da so bili mišljeni kot kvantitativni v smislu tega izraza, kakršen je veljaven v preučevanju gibanja od Galilea dalje. Tako v antiki kot v srednjem veku so ljudje, ki so jim pri astronomiji in občasno pri optiki meritve bile relevantne, razpravljali o teh zakonih gibanja brez kakršnekoli še tako zakrite povezave s katerokoli vrsto kvantitativnih opazovanj. Vrhu tega se zakoni nikoli ne aplicirajo na naravo, razen v argumentih, ki slonijo na *reductio ad absurdum*. Njihov namen se mi zdi kvalitativen – so namreč trditve, ki uporabljajo slovar proporc, o nekaterih pravilno opaženih kvalitativnih pravilnostih. To pojmpvanje se utegne zdeti sprejemljivejše, če se spomnimo, da so po Evdoksu celo geometrijsko razmerje praviloma interpretirali kot nenumerično.

[23] Aristotel *Works* 2:249b30-250a4.

običajno mislilo.[24] Toda glede na aristotelski pojem hitrosti – pojem, ki v večini primerov uporabe ni problematičen – opazimo, da je zgornji zakon edini preprosti zakon, ki je na voljo. Če je gibanje takšno, da sta povprečna in trenutna hitrost identični, potem *ceteris paribus* mora biti prepotovana razdalja sorazmerna s časom. Če poleg tega skupaj z Aristotelom (in Newtonom) domnevamo, da "bosta dve sili, od katerih vsaka posebej premakne eno od dveh uteži za določeno razdaljo v določenem času ... premaknili združeni uteži za enako razdaljo v enakem času", potem mora biti hitrost neka funkcija kvocienta sile z velikostjo telesa.[25] Aristotelov zakon sledi neposredno iz predpostavke, da je funkcija pač najbolj preprosta, ki je na voljo, namreč sam kvocient. Morda se to ne zdi veljavni način, kako priti do zakonov gibanja, toda Galilejevi postopki so bili pogosto enaki.[26] V tem posebnem pogledu je Galileja od Aristotela razlikovalo v glavnem dejstvo, da je Galilei začel z drugačnim pojmovanjem hitrosti. Ker ni pojmoval vseh gibanj kot kvazienakomernih, hitrost ni bila edina količina gibanja, ki bi se lahko spreminjala z uporabljeno silo, velikostjo telesa itd. Galilei je lahko upošteval tudi variacije pospeškov.

Teh primerov bi lahko navedli znatno več, ampak moja poanta je najbrž že jasna. Aristotelov pojem hitrosti, v katerem sta bila pomešana ločena moderna pojma povprečne in trenutne hitrosti, je bil bistven del njegove celotne teorije gibanja in je imel implikacije v njegovi celotni fiziki. To vlogo je lahko igral zato, ker ni bil le zmedena ali kaka drugačna definicija. Namesto tega je imel fizikalne implikacije in je delno deloval kot zakon narave. Teh implikacij ne bi mogla nikoli spodbiti opazovanja ali logika v svetu, v katerem bi bila vsa gibanja enakomerna ali kvazienakomerna, Aristotel pa je ravnal, kot da bi živel v tovrstnem svetu. Seveda je bil njegov svet dejansko drugačen, toda njegov pojem je kljub temu deloval tako uspešno, da so potencialni konflikti z opazovanji ostali popolnoma neopaženi. In medtem ko je bilo tako – to je do takrat, ko so potencialne težave pri uporabljanju pojma postale aktualne –, ne moremo v resnici govoriti o aristotelskem pojmu hitrosti kot o zmedenem. Seveda lahko trdimo, da je bil "napačen" ali "nepravilen" v enakem smislu, kot uporabljamo te izraze v zvezi z zastarelimi zakoni in teorijami. Zraven tega lahko trdimo, da so bili zavoljo napačnosti pojma ljudje, ki so ga uporabljali, *podvrženi temu, da postanejo zmedeni*, kot so bili to Salviatijevi sogovorniki. Mislim pa, da ne moremo najti nobene notranje pomanjkljivosti v pojmu kot takem. Njegove pomanjkljivosti niso v njegovi logični konsistentnosti, temveč v nezmožnosti, da ustreza celotni prefinjeni strukturi sveta, na katerega so pričakovali, da se bo nanašal. Zato je bilo učenje prepoznavanja njegovih pomanj-

[24] Za neizpodbitno kritiko tistih, ki sem jim zdi zakon nesmiseln, glej Stephen Toulmin, "Criticism in the History of Science: Newton on Absolute Space, Time and Motion, I", *Philosophical Review*, 68 (1959), str. 1-29, še posebej 1. opomba.

[25] Aristotel *Works* 2, 250a25-28.

[26] Na primer: "Kadar torej opazujem kamen, ki je v začetku pri miru in potem pada z nekega dvignjenega položaja ter neprestano pridobiva nove prirastke hitrosti, zakaj ne bi verjel, da se ti prirastki dogajajo na način, ki je izredno preprost in vsakomur očiten? Če sedaj natančno pregledamo to zadevo, ne najdemo bolj preprostega dodajanja ali naraščanja od tistega, ki se ponavlja vedno na enak način." *Prim*. Galileo Galilei, *Dialoga o dveh novih znanostih*, str. 154-155 v angleškem prevodu H Crewa in A. de Salvia (Evanston in Chicago, 1946). Galilei je kajpada nadaljeval z eksperimentalnim preverjanjem.

kljivosti nujno učenje tako o svetu kot o pojmu.

Če se zdi zakonodajna vsebina posameznih pojmov tuja, je to najbrž zaradi konteksta, znotraj katerega sem se tega lotil. Jezikoslovcem je ta stvar že dolgo znana, čeprav sporna, skozi dela B. L. Worfa.[27] Braithwaite je, sledeč Ramseyu, razvil podobno tezo z uporabo logičnih modelov, da bi pokazal neločljivo mešanico zakona in definicije, ki mora označevati funkcijo celo sorazmerno osnovnih znanstvenih pojmov.[28] Bliže tej poanti so nekatere novejše razprave v logiki o uporabi "redukcijskih stavkov" pri oblikovanju znanstvenih pojmov. To so stavki, ki določajo (v logični obliki, ki tu ni treba, da nas zanima) opazovalne ali testne pogoje, v katerih je dani pojem lahko uporabljen. V praksi gredo tesno skupaj s konteksti, v katerih je dejansko pridobljena večina znanstvenih pojmov, kar tudi dela njihovi dve najbolj izstopajoči lastnosti še posebej pomembni. Prvič, nekateri redukcijski stavki – včasih velika večina – so potrebni, da priskrbijo danemu pojmu obseg uporabe, ki je potreben za uporabo pojma v znanstveni teoriji. Drugič, brž ko za uvedbo posameznega pojma uporabimo več redukcijskih stavkov, se za te stavke izkaže, da implicirajo "določene trditve, ki imajo značaj empiričnih zakonov ... Nizi redukcijskih stavkov na svojevrsten način kombinirajo funkcije pojmov in funkcije tvorbe teorij".[29] Ta citat nam skupaj s prejšnjim stavkom zelo natanko opisuje situacijo, ki smo jo pravkar obravnavali.

Toda ni nam treba popolnoma preiti v logiko in filozofijo znanosti, da bi prepoznali zakonodajno funkcijo znanstvenih pojmov. V drugi obleki je že znana vsakemu zgodovinarju, ki je pobliže preučeval razvoj pojmov, kot so element, vrste, masa, sila, prostor, kaloričnost ali energija.[30] Te in še mnoge druge znanstvene pojme nenehno srečamo v matrici zakona, teorije in pričakovanj, iz katerih – zaradi definicije – ne morejo biti popolnoma izločeni. Da bi odkril, kaj pomenijo, mora zgodovinar preučiti tako to, kar je o njih povedano, kot tudi način, kako so uporabljeni. V tem procesu običajno odkriva številna različna merila, ki določajo njihovo uporabo in katerih soobstajanje lahko razumemo le s sklicevanjem na mnoga druga znanstvena (in včasih zunajznanstvena) prepričanja, ki vodijo ljudi, ki jih uporabljajo. Iz tega sledi, da ti pojmi niso bili namenjeni za uporabo v kateremkoli možnem svetu, ampak le v svetu, kot ga je znanstvenik videl. Njihova uporaba je le en znak njegove zavezanosti večjemu telesu zakona zakona in teori-

[27] B. L. Whorf, *Language, Thought and Reality: Selected Writings*, ur. John B. Carroll, Cambridge, Mass. 1956.

[28] R. B. Braithwaute, *Scientific Explanation*, Cambridge 1953, str. 50-87. Glej tudi W. V. O. Quine, "Two Dogmas of Empiricism", v *From a Logical Point of View*, Cambridge, Mass. 1953, str. 20-46.

[29] C. G. Hempel, *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*, 2. zv., št. 7., v *International Encyclopedia of Unified Science*,Chicago 1952. Osnovna razprava o redukcijskih stavkih je v Rudolph Carnap, "Testability and Meaning", *Philosophy of Science*, 3 (1936), str. 420-471, in 4 (1937), str. 2-40.

[30] Primera kaloričnosti in mase sta še posebej poučna. Prvi zato, ker je vzporeden zgoraj obravnavanemu primeru, drugi pa zato, ker se je razvijal v obratni smeri. Pogosto opozarjajo, da je Sadi Carnot izpeljal dobre eksperimentalne rezultate iz kalorične teorije zato, ker je njegov pojem toplote kombiniral značilnosti, ki so bile pozneje razdeljene med toploto in entropijo. (Glej mojo izmenjavo misli z V. K. La Mer, *American Journal of Physics*, 22 (1954), str. 20-27; 23 (1955), str. 91-102 in 387-389. V zadnjem od teh prispevkov oblikujem poanto na način, ki se ga zahteva tu.) Po drugi strani pa masa kaže nasprotno smer razvoja. V newtonovski teoriji sta inertna masa in gravitacijska masa ločena pojma, merljiva z drugačnimi sredstvi. Potreben je eksperimentalno preverjen naravni zakon, da lahko trdimo, da bosta ta dva načina meritve vedno dala – znotraj instrumentalnih omejitev – enak rezultat. Po teoriji splošne relativnosti pa ločen eksperimentalni zakon ni potreben. Obe meritvi *morata* dati enak rezultat, ker merita isto količino.

je. Nasprotno, zakonodajno vsebino tega večjega telesa prepričanj delno nosijo sami pojmi. To je razlog, zakaj so se v teku znanstvenega razvoja njihov pomen in njihova merila za uporabo tako pogosto in tako drastično spremenili, četudi imajo mnogi od teh pojmov zgodovino, ki je koekstenzivna z zgodovino znanosti, v kateri so delovali.

Če se končno vrnemo k pojmu hitrosti, opazimo, da ga Galilejeva reformulacija ni naredila enkrat za vselej logično čistega. Ta pojem ni bil nič manj kot njegov aristotelski predhodnik osvobojen implikacij o tem, kako naj bi se obnašala narava. Rezultat tega je bil, da je nakopičeno izkustvo podvomilo o tem pojmu hitrosti – spet podobno, kot se je zgodilo z aristotelskim pojmom; to pa se je zgodilo proti koncu prejšnjega in na začetku tega stoletja. Ta epizoda je predobro znana, da bi zahtevala daljšo razpravo. Ko ga apliciramo na pospešena gibanja, ima Galilejev pojem hitrosti kot posledico obstajanje množice fizikalno nepospešenih prostorskih koordinatnih sistemov. To je nauk Newtonovega eksperimenta z vedrom, ki ga nihče od relativistov 17. in 18. stoletja ni bil zmožen pojasniti. Poleg tega ima popravljen pojem hitrosti, ki ga uporabljamo v tem članku – če ga apliciramo na linearna gibanja – za posledico veljavnost tako imenovanih Galilejevih transformacijskih enačb, te pa določajo fizikalne lastnosti, na primer, seštevanje hitrosti materije ali hitrosti svetlobe. Brez podpore kakršnekoli nadgradnje zakonov in teorij, kot je Newtonova, so dajale neznansko pomembne informacije o tem, kakšen je svet.

Bolje rečeno: so nekdaj dajale. Eno izmed prvih velikih zmagoslavij fizike 20. stoletja je bilo priznanje, da je o teh informacijah možno podvomiti in – kot posledica tega – spremeniti pojme hitrosti, prostora in časa. Še več, v tem preoblikovanju pojmov so miselni eksperimenti spet igrali bistveno vlogo. Zgodovinski proces, ki smo ga preučili zgoraj skozi Galilejevo stališče, se je od tedaj ponovil glede na enako konstelacijo pojmov. Popolnoma mogoče je, da se lahko spet zgodi, saj je to eden od temeljnih procesov, preko katerega znanost napreduje.

Moj argument je sedaj skoraj popoln. Da bi odkrili prvino, ki še manjka, na kratko povzemimo glavne točke dosedanje razprave. Začel sem s predlogom, da pomembna skupina miselnih eksperimentov deluje tako, da sooči znanstvenika s protislovjem ali nasprotjem, impliciranem v njegovem načinu razmišljanja. Prepoznanje protislovja se je torej izkazalo kot glavna priprava za njegovo odstranitev. Rezultat miselnega eksperimenta je razvoj jasnih pojmov, ki so nadomestili nejasne, prej uporabljene pojme. Podrobnejši pregled pa razkriva bistveno težavo v tej analizi. Pojmi, ki so bili "popravljeni" kot posledica miselnega eksperimenta, niso pokazali nikakršne *intrinsične* zmede. Če je uporaba le-teh znanstvenika privedla do problemov, so bili ti problemi enake vrste kot tisti, ki jim je znanstvenik izpostavljen pri uporabi katerekoli eksperimentalno utemeljene teorije ali zakona. Pojavili se niso izključno zaradi njegovega mentalnega orodja, temveč zaradi težav, odkritih pri poskusu, da bi se to orodje ujemalo s predhodno "neprilagojenimi" izkustvi. Za očitno zmedo je bila odgovorna narava, ne pa logika sama. Ta si-

tuacija me je napeljala k sklepu, da se iz te vrste miselnih eksperimentov, ki smo jih tukaj preučili, znanstvenik nekaj nauči tako o svetu kot o svojih pojmih. Zgodovinsko gledano je njihova vloga podobna tisti dvojni vlogi, ki jo imajo dejanski laboratorijski eksperimenti in opazovanja. Prvič, miselni eksperimenti lahko razkrijejo nezmožnost narave, da se prilagaja predhodno dani množici pričakovanj. Poleg tega pa lahko nakazujejo posebne načine, kako je treba v prihodnje popraviti tako pričakovanja kot teorijo.

Toda, kako lahko – če torej zastavimo preostalo vprašanje – to storijo? Laboratorijski eksperimenti igrajo te vloge zato, ker znanstveniku dajejo nove in nepričakovane informacije. Miselni eksperimenti pa se morajo – nasprotno – opirati zgolj na že razpoložljivo informacijo. Če lahko imajo oboji tako podobne vloge, se mora to dogajati zato, ker miselni eksperimenti znanstveniku občasno omogočajo dostop do informacij, ki so obenem pri roki, vendar pa so mu nekako nedostopne. Naj nakažem, čeprav nujno le na kratko in nepopolno, kako je to lahko mogoče.

Na drugem mestu sem pokazal, da je razvoj zrele znanstvene panoge običajno v veliki meri določen s tesno prepleteno zgradbo pojmov, zakonov, teorij in instrumentalnih tehnik, ki jih posamezni praktik pridobi s strokovnim izobraževanjem.[31] Ta časovno preverjena zgradba prepričanja in pričakovanja mu pove, kakšen je svet in obenem definira probleme, ki še vedno potrebujejo strokovno pozornost. Ti problemi so tisti problemi, ki bodo – ko bodo rešeni – razširili natančnost in obseg ujemanja med obstoječim prepričanjem na eni ter opazovanjem narave na drugi strani. Ko so problemi izbrani na ta način, običajno pretekli uspeh zagotavlja tudi prihodnjega. En razlog, zakaj se zdi, da znanstveno raziskovanje vztrajno napreduje od enega rešenega problema k drugemu, je v tem, da strokovnjaki omejijo svojo pozornost na probleme, definirane s pojmovnimi in instrumentalnimi tehnikami, ki so že na voljo.

Ta način izbire problemov pa kajpada, čeprav v veliki meri omogoča kratkoročni uspeh, prav tako zagotavlja dolgoročne neuspehe, ki se izkažejo celo za bolj pomembne za znanstven napredek. Celo podatki, ki jih tak omejeni vzorec raziskovanja daje znanstveniku, nikoli v celoti ali natanko ne ustrezajo njegovim teorijsko povzročenim pričakovanjem. Nekateri od teh neuspehov pri ustrezanju ustvarijo tekoče probleme raziskovanja; drugi so potisnjeni na obrobje zavedanja, nekateri pa so v celoti potlačeni. Običajno nesposobnost prepoznavanja in soočenja z anomalijo upravičuje sam dogodek. Pogosto manjša instrumentalna prilagoditev ali majhna artikulacija obstoječe teorije naposled zmanjša očitno neskladnost z zakonom. Odlašanje v zvezi z neskladnostmi, kadar se te prvič pojavijo, je povabilo k nenehnim motnjam.[32] Ampak vse neskladnosti ne reagirajo na manjše prilagodi-

[31] Za nepopolno razpravo o tem in naslednjih vprašanjih glej moje prispevke "The Function of Measurement in Modern Physical Science", *Isis*, 52 (1961), str. 161-190; *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago University Press, Chicago 1977; "The Function of Dogma in Scientific Research", v A. C. Crombie (ur.), *Scientific Change*, New York 1963, str. 347-369. Celoviteje in z mnogimi dodatnimi primeri je celoten predmet obravnavan v *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago University Press, Chicago 1970.

[32] Veliko dokaznega gradiva o tem je mogoče najti v Michael Polyani, *Personal Knowledge: Towards a Post-Cri-*

tve obstoječe pojmovne in instrumentalne zgradbe. Med temi, ki ne reagirajo tako, je nekaj takih, ki jih – bodisi zato, ker so posebej osupljive, bodisi zato, ker se znova in znova pojavljajo v mnogih različnih laboratorijih – ne moremo neskončno prezirati. Čeravno ostajajo neprilagojene, s postopno naraščajočo silo trkajo na zavest znanstvene skupnosti.

Z nadaljevanjem tega procesa se vzorec raziskovanja, ki je značilen za skupnost, postopno spreminja. Najprej se poročila o neustreznih opazovanjih vedno bolj pogosto pojavljajo na straneh laboratorijskih zvezkov ali pa v obliki postranskih zadev v objavljenih poročilih. Potem se raziskovanje vedno bolj in bolj usmerja na samo anomalijo. Tisti, ki jo poskušajo narediti za zakonoliko, se bodo vedno bolj prepirali glede pomena pojmov in teorij, ki so jih dolgo delili, ne da bi se zavedali dvoumnosti. Manjšina bo začela kritično analizirati zgradbo prepričanj, ki je skupnost privedla v to njeno sedanjo slepo ulico. Ob posameznih priložnostih bo celo filozofija postala legitimno znanstveno orodje, kar praviloma ni. Menim, da so nekateri ali pa celo vsi ti simptomi krize skupnosti nespremenljiv uvod v temeljno pojmovno prenovo, ki jo odstranitev neprilagodljive anomalije skoraj vedno zahteva. Praviloma se takšna kriza konča le takrat, kadar nek posebno domiselni posameznik ali skupina posameznikov predloži novo zgradbo zakonov, teorij in pojmov – tako, ki lahko prilagodi prej neskladna izkustva in ravno tako večino ali pa vsa prej prilagojena izkustva.

Ta proces pojmovne prenove sem na drugem mestu označil kot znanstveno revolucijo. Take revolucije niso nujno tako popolne, kot nakazuje zgornji oris, vse pa delijo z njim eno bistveno značilnost. Potrebni podatki za revolucijo so na obrobju znanstvene zavesti obstajali že prej; pojav krize jih premakne v središče pozornosti, revolucionarna pojmovna prenova pa omogoča, da jih vidimo na nov način.[33] Kar je bilo poprej nejasno znano *navkljub* mentalni opremi skupnosti pred revolucijo, je po njej natančno znano *zaradi* mentalne opreme skupnosti.

Ta sklep ali konstelacija sklepov je seveda nekako preveč veličastna in preveč zamegljena za tukajšnjo splošno dokumentacijo. Vseeno pa trdim, da so bile v določeni omejeni uporabi že dokumentirane številne njene bistvene prvine. Kriza, povzročena z neuspehom pričakovanj, ki ji sledi revolucija, je v samem jedru miselno-eksperimentalnih situacij, ki smo jih obravnavali. Nasprotno, miselni eksperiment je eno od temeljnih analitičnih orodij, ki so uporabljena med krizo in ki kasneje pomagajo promovirati temeljno pojmovno reformo. Rezultat miselnih eksperimentov je lahko enak rezultatu znanstvenih revolucij: znanstveniku lahko omogočijo, da uporablja kot integralni del svojega znanja nekaj, za kar je to znanje prej storilo, da mu je bilo nedostopno. V tem smislu spremenijo njegovo znanje o svetu. Ravno zaradi tega, ker lahko imajo ta učinek, pa se tudi tako opazno

tical Philosophy, Routledge and Kegan Paul, London 1958, še posebej 9. poglavje.

[33] Besedna zveza "omogoča, da jih vidimo na nov način" mora tukaj ostati metafora, čeprav menim, da velja dobesedno. N. R. Hanson je v *Patterns of Discovery*, Cambridge University Press, Cambridge 1958, že dokazal, da je tisto, kar znanstveniki vidijo, odvisno od njihovih prejšnjih prepričanj in šolanja, veliko dokaznega gradiva o tem pa je najti v mojem delu *The Structure of Scientific Revolutions*.

kopičijo v delih ljudi, kot so Aristotel, Galilei, Descartes, Einstein in Bohr, v delih velikih snovalcev novih pojmovnih zgradb.

Vrnimo se zdaj na kratko še zadnjič k našima eksperimentoma, Piagetovemu in Galilejevemu. Menim, da je bilo tisto, kar nam je povzročalo težave glede njiju, dejstvo, da smo v predeksperimentalni miselnosti implicitno odkrili zakone narave, ki so bili v nasprotju z informacijami, za katere smo bili gotovi, da jih naši subjekti že imajo. Dejansko so se lahko sploh kaj naučili iz eksperimentalne situacije zgolj zato, ker so imeli informacijo. V teh okoliščinah nas je začudila njihova nesposobnost, da bi videli nasprotje; nismo bili gotovi o tem, kaj se morajo še naučiti in smo bili zato prisiljeni, da smo jih obravnavali kot zmedene. Ta način opisovanja situacije po mojem mnenju ni bil popolnoma napačen, bil pa je zavajajoč. Čeprav mora moj nadomestni sklep ostati delno metaforičen, predlagam naslednji opis namesto zgornjega.

Že nekaj časa pred tem, ko smo jih srečali, so naši subjekti v svojem stiku z naravo uspešno uporabljali pojmovno zgradbo, ki je bila različna od tiste, ki jo uporabljamo sami. Ta zgradba je bila časovno preverjana; ni jih še soočila s težavami. Kljub temu pa so do trenutka, ko smo jih srečali, naposled pridobili raznovrstna izkustva, ki jih ni bilo mogoče prilagoditi z njihovih tradicionalnim načinom obravnavanja sveta. Na tej točki so imeli v rokah vsa izkustva, potrebna za temeljno prenovitev svojih pojmov, vendar je obstajalo nekaj o teh izkustvih, česar še niso uvideli. Zato so bili podložni zmedi in so bili morda že vznemirjeni.[34] Popolna zmeda pa se je kajpada pojavila le v miselnoeksperimentalni situaciji, in tudi tedaj kot uvod v svojo ozdravitev. S spremembo občutene anomalije v konkretno protislovje je miselni eksperiment informiral naše subjekte o tem, kaj je bilo narobe. Tako prvo jasno pojmovanje neskladja med izkustvi in impliciranimi pričakovanji je ponudilo nujne ključe, kako pravilno postaviti situacijo.

Katere značilnosti mora imeti miselni eksperiment, da bo sposoben imeti te učinke? Del mojega predhodnega odgovora lahko še vedno velja. Če naj bi zamišljena situacija premostila neskladje med tradicionalnim pojmovnim aparatom in naravo, potem mora znanstveniku dopustiti, da uporablja svoje običajne pojme tako, kot jih je uporabljal prej. Torej ne sme delati sile normalni rabi. Po drugi strani pa del mojega prejšnjega odgovora, ki je imel opravka s fizikalno verjetnostjo, sedaj potrebuje popravke. Vseboval je domnevo, da so miselni eksperimenti naslovljeni na čisto logična protislovja ali zmede; katerakoli situacija, ki bi lahko razodela takšno protislovje, bi potemtakem zadostovala. Potem sploh ne bi bilo nobenega pogoja fizikalne verjetnosti. Če pa predpostavljamo, da sta narava in pojmovni aparat družno vpletena v protislovje, ki ga kaže miselni eksperiment, je potreben močnejši pogoj. Čeprav za zamišljeno situacijo niti ni nujno, da bi jo bilo mogoče celo potencialno udejaniti v naravi, mora biti protislovje, ki ga izpeljemo iz nje,

[34] Piagetovi otroci seveda niso bili v težavah (vsaj zaradi relevantnih razlogov ne) vse dotlej, dokler jim niso pokazali njegovega eksperimenta. V zgodovinski situaciji pa miselni eksperiment nasplošno izzove naraščajoča zavest, da nekje za nekaj gre.

tako, da bi ga lahko predstavila sama narava. Celo ta pogoj ni dovolj močan. Konflikt, s katerim se znanstvenik sooči v eksperimentalni situaciji, mora biti tak, s katerim se je znanstvenik soočil že prej, pa če ga je še tako nejasno opazil. Če še nima tolikšne izkušnje, še ni pripravljen, da bi se kaj naučil zgolj iz eksperimenta.