

12. Mehanička filozofija i moderna fizika

Priroda je čovjeku istodobno i poznata i nepoznata. Poznata nam je stoga što smo kao dio prirode neprestano s njom suočeni: opažamo gibanja nebeskih i zemaljskih tijela, promjene biljaka i životinja, hladnoću i toplinu i mnoštvo drugih prirodnih pojava. Nepoznata nam je pak stoga što ne opažamo uzroke tih pojava i možemo samo pomišljati zašto se u prirodi događa baš to što se događa, koja zbivanja nedostupna našim osjetilima dovode do tih pojava, tih opazivih stanja i promjena. Priroda nam je nepoznata stoga što nam se zbilja, ono što uistinu jest i ono što se uistinu događa, ne otkriva kao takva, već kroz pojave, i jedini nama raspoloživ put do zbilje je zamišljanje na temelju opaženih pojava. Tako pomišljena zbilja nudi nam objašnjenje opaženih prirodnih pojava i čini prirodu malo bližom i poznatijom.

No kako zamisliti tu zbilju iza pojava, kako početi misliti o svijetu kakav uistinu jest? Misliti o svijetu kakav uistinu jest zapravo znači misliti o svijetu kao cjelini, u mislima postaviti svijet kao cjelinu »pred sebe«, kao neki objekt, kao predmet mišljenja. No mi smo, s druge strane, dio svijeta i uvijek ga doživljavamo »iznutra«, uvijek kao dio svijeta suočen s drugim dijelovima svijeta. Misliti o svijetu kakav uistinu jest znači pokušati mislima nadići taj naš unutarstvetski položaji i unutarstvetski doživljaj. Povijest nam pokazuje da taj naš pokušaj objašnjavanja prirodnih pojava, taj naš pokušaj oblikovanja predodžbe zbilje, svijeta kakav uistinu jest, taj naš pokušaj shvaćanja onog nepoznatog, u pravilu polazi od onog što nam je donekle poznato, tj. od našeg unutarstvetskog doživljaja, na temelju kojeg mi, kao dio svijeta, oblikujemo shvaćanje nekog drugog dijela svijeta.

Da bismo mogli početi misliti o svijetu kakav uistinu jest prije svega moramo biti u stanju reći što svijet jest jer nam tek odgovor na to pitanje kaže kako misliti o svijetu, koja konkretna pitanja postavljati i koju vrstu odgovora tražiti. Moramo reći što je ona cjelina koju nikad ne doživljavamo i ne možemo doživjeti kao cjelinu, kao objekt pred nama, već uvijek i samo kao dio suočen s drugim dijelovima. To je popriličan izazov čovjekovoj kreativnosti, a povijest nam pokazuje, vidjeli smo kroz prethodne tekstove, da je u takvim okolnostima pitanje »Što je svijet?« u pravilu klizilo u pitanje »Čemu je svijet nalik?«. Upoznali smo različite predodžbe svijeta, no u retrospekciji možemo uočiti da u osnovi svake od tih predodžaba stoji neki unutarstvetski uzor koji služi kao metafora svijeta: shvaćanje nekog sadržaja svijeta koristi se kao ishodište shvaćanja svijeta u cjelini. Nešto u svijetu, nešto nama donekle poznato, tumači se kao svojevrsni model svijeta i svijet se zamišlja po uzoru na to. Kad se pitamo »Čemu je svijet nalik?« zapravo među onim što nam je poznato tražimo ono za što nam se čini da u sebi najpotpunije objedinjuje sve što s našeg unutarstvetskog motrišta znamo o svijetu, nadajući se da se narav zbilje ipak u nekoj mjeri zrcali u sveukupnosti pojava. Drugim riječima, nadamo se da zbilja nije posve različita od svega s čime smo iskustveno suočeni i da se barem neke značajke zbilje u barem nekoj mjeri zrcale u barem nekim pojavama, da je svijet kakav jest barem donekle, barem u nekim vidovima, sličan svijetu kakav nam se pokazuje. Uz pretpostavku da je uistinu

tako, da se u našem cjelokupnom iskustvu naziru makar nejasni i nepotpuni obrisi zbilje, opravdano je kao ishodište oblikovanja predodžbe zbilje uzeti neki predmet iskustva – onaj u kojem su po svemu što znamo ti obrisi najjasniji i najpotpuniji – kao metaforu svijeta i naše shvaćanje cjeline svijeta graditi po uzoru na naše shvaćanje tog predmeta iskustva.

I bez povijesnog istraživanja možemo zaključiti da je odabir takvog uzora nužno povijesno uvjetovan. Pri odabiru te metafore oslanjamo se na »sve što znamo«, odlučujemo se za nju prema našem najboljem ukupnom dotadašnjem znanju, pri čemu to znanje uključuje iskustveno poznavanje prirodnih pojava, praktično znanje svake vrste i teorijsko znanje stečeno promišljanjem i iskušavanjem prethodnih metafora. Vidjeli smo da je prva takva metafora bila svijet kao društvo. Ljudska zajednica se uzima kao uzor za oblikovanje predodžbe zbilje i svijet se tumači kao zajednica ljudi i bića sličnih ljudima po tome što posjeduju razum, volju i osjećaje. Čovjek je sam sebi najbliži, najpoznatiji, i prirodno je da prvi pokušaj objašnjavanja prirodnih pojava polazi od značajki koje čovjek uočava u sebi i u svojim odnosima s drugim ljudima. Takav pristup nudi vrlo širok okvir, unutar kojeg se mogu oblikovati različite predodžbe svijeta. Vidjeli smo nadalje da je razvoj antičkoga grčkog društva – nadasve javljanje općevaljanih nepromjenljivih racionalnih zakona – ponudio novu široku metaforu: svijet kao sustav uređen općevaljanim nepromjenljivim racionalnim zakonima, što je označilo početak zapadne filozofije, početak pothvata shvaćanja zbilje, izgradnje racionalne predodžbe zbilje. To je očigledno također bio širok okvir unutar kojeg su u antici iskušani različiti pristupi. Primjerice, detaljno smo upoznali Aristotelov »organski« svemir, oblikovan oko metafore svijeta kao organizma.

Vidjeli smo nadalje da su napori da se konkretizira slika svijeta kao strukture uređene racionalnim zakonima rezultirali i jednom predodžbom čisto »mehaničkoga« svemira – antičkim atomizmom. Antički je atomizam bio teorijska konstrukcija nastala kao specifični odgovor na metafizički problem promjene. Važno je uočiti da u vremenu u kojem je nastao taj atomizam u čovjekovom iskustvenom svijetu nije bilo ničega što bi moglo poslužiti kao metafora takvog svemira, nije bilo nikakvog unutarsvjetskog uzora u kojem bi se nazirali obrisi takvog svemira, nikakvog očigledno »mehaničkog« sustava; ukratko, nisu postojali nikakvi složeni strojevi, mehanizmi, automati. Antički je atomizam izazvao različite prigovore, naročito su bile neprihvatljive njegove etičke posljedice, a moguće je da je jedan razlog njegove neuvjerljivosti bilo nepostojanje unutarsvjetskog uzora koji bi mogao poslužiti kao metafora takvog svijeta: zašto bi netko prihvatio takvu sliku svijeta kad se temeljne značajke tako zamišljenog svijeta nigdje u svijetu ne pokazuju?¹ No tijekom dvije tisuće godina, od nastanka antičkoga atomizma krajem 5. st. pr. Kr. do

¹ Spomenimo da smo mi danas u donekle sličnoj situaciji s obzirom na kvantnu mehaniku. Kvantna mehanika je također jedna apstraktna teorijska konstrukcija, nastala, doduše, na drukčiji način: natezanjem formalizma klasične fizike tako da uspije obuhvatiti rezultate eksperimenata s pojedinačnim atomima i njihovim sastavnicama. Zbog takvog podrijetla kvantna mehanika je empirijski uspješna i stoga po mjerilima moderne znanosti prihvatljiva, ali mi još uvijek tragamo za metaforom »kvantne« zbilje i dobro je pitanje je li takvu metaforu uopće moguće naći jer je još uvijek neriješeno pitanje kako svijet našeg iskustva, ono što mi ljudi opažamo, svijet kakvim ga mi doživljavamo, izranja iz zbilje pomišljene na temelju formalizma kvantne mehanike.

početka 17. stoljeća, svijet se na različite načine bitno promijenio, a jedna od promjena je bila ta da su strojevi postali dio čovjekovog svakidašnjeg iskustva.

1. Mehaničke naprave od antike do renesanse

Složeni strojevi počeli su se u antičkom svijetu pojavljivati tek u 3. st. pr. Kr., tj. nakon Aristotelove smrti. Spomenimo nekoliko za našu temu zanimljivih mehaničkih naprava.

VODENICA, MODELI GIBANJA NEBESKIH TIJELA I HERONOVO KAZALIŠTE

U praktičnom smislu najvažniji je izum bila vodenica, koja se javlja u Grčkoj oko 100. pr. Kr. Vodenicu s vertikalnim kolom spominje više autora, a prvi posve pouzdan opis potječe od Vitruvija (? – oko 25. pr. Kr.), koji kaže da ona spada među »strojeve koji se rijetko koriste«. Rimljani su donekle proširili uporabu vodenica no uistinu važne postaju tek u srednjem vijeku. Postoji malo pouzdanih arheoloških nalaza antičkih vodenica, a ni jedan prije 2. st. Sustavno korištenje snage vode, kao u nizu od 16 vodenica kod Barbégala kraj Arlesa na jugu Francuske, nalazimo sredinom 3. stoljeća, a do kraja 4. stoljeća je opskrba mlinova vodom postala predmet zakonske regulative i parničenja.

Za našu su temu posebno zanimljivi modeli gibanja nebeskih tijela. Ciceron (106. pr. Kr. – 43. pr. Kr.) u jednom pismu piše kako je »nedavno napravio globus koji svojim okretanjem pokazuje gibanje Sunca, zvijezda i planeta, kako danju, tako i noću, i to baš onako kako se pojavljuju na nebu«. Osim toga je napisao da je Arhimed izradio model koji je »oponašao gibanje nebeskih tijela«. Čini se da su ostaci jedne takve naprave otkriveni u olupini broda iz 1. st. pr. Kr., nađenoj 1900. godine kraj otočića Antikythera, sjeverozapadno od Krete. Nađeno je mnoštvo brončanih zupčanika, od kojih su neki na sebi imali natpise. Rekonstrukcija naprave pokazuje da se radi o računalu za određivanje dana po solarnom i lunarnom kalendaru. Jedan okretaj glavnog kotača odgovarao je jednoj solarnoj godini, a manju su kotači pokazivali položaj Sunca i Mjeseca, kao i dizanje najvažnijih zvijezda.

Konačno, spomenimo jednu igračku, stroj načinjen za rasonodu, koji pokazuje da je ideja automatizacije bila poznata antičkom svijetu. To je »automatsko kazalište« koje je izradio Heron (djelovao u 1. stoljeću u Aleksandriji). U toj napravi lutkice grade brod, zabijaju čavle, pile drva itd., a pokretao ju je uteg koji se spuštao u posudu napunjenu sjemenkama gorušice koje istječu kroz rupicu, što je određivalo brzinu spuštanja utega.

RAZLOZI OGRANIČENE UPORABE MEHANIČKIH NAPRAVA U ANTICI

Imamo li na umu da su antički autori uviđali mogućnost primjene mehanike u praktične svrhe, iznenađuje da to nije dovelo do plodnijih rezultata. Tijekom razdoblja od 500. pr. Kr. do 500. tehnika nije stagnirala. Tijekom tog perioda su izumljene važne mehaničke naprave. No ipak je popis tih naprava skroman i za povijest je otvoreno pitanje zašto je bilo tako i zašto su ljudi antike sporo iskorištavali ili u nekim slučajevima posve zanemarili mehanička načela koja su im bila poznata.

Često se tvrdi da ključ za odgovor na to pitanje leži u instituciji ropstva. Tako se kaže da sve dok je bilo lako doći do robova nije bilo poticaja za uvođenje umjetnih izvora energije i naprava za olakšanje rada bilo koje vrste. Nedvojbeno u tome ima istine. Moguće je da je konačno uvođenje vodenica u uporabu nakon 3. stoljeća bilo barem djelomično potaknuto nedostatkom radne snage od kojeg je patilo kasno Rimsko Carstvo. No antički je robovlasnik imao barem dva dobra razloga za nastojanje da smanji svoju ovisnost o ropskom radu ako ikako može: nije jeftino hraniti robove, a ponekad ih je bilo teško i kontrolirati.

Poučno je u tom smislu usporediti sporo širenje vodenice i ranije mnogo brže uvođenje u uporabu »pompejskog« mlina koji je pokretao magarac. Čini se da se taj mlin prilično brzo širio zapadnim Sredozemljem tijekom 2. stoljeća. U ovom slučaju ropski rad bjelodano nije priječio korištenje tehnike. S druge strane vodenica je zahtijevala ulaganje znatnog kapitala, napose ako je vodu trebalo dovoditi akvaduktom. Premda su vladari i građani ulagali velike iznose u građevinske pothvate raznih vrsta, u antičkom svijetu nalazimo vrlo rijetke primjere većeg ulaganja kapitala u proizvodnu industriju. U antičkom su svijetu najmoćnije pokretačke sile bile moć, čast i status. To ne znači da zarada nije bila pokretač. Naprotiv, za bogatstvom se težilo. No zemlja je bila ideal i kao izvor i kao izraz bogatstva. Ako je čovjek stekao bogatstvo na druge načine, trgovinom ili proizvodnjom za tržište, svoje je viškove češće ulagao u zemlju, u kupnju imanja, nego u »razvoj posla«. Zapravo je bogatstvo obično smatrano sredstvom koje osigurava ulaz u krugove zemljoposjedničke aristokracije, a manje je bilo samo sebi svrhom.

Iz različitih razloga ni vodena para ni vjetar nisu u antičkom svijetu djelotvorno korišteni kao izvori energije, a voda tek pri kraju tog razdoblja. Glavni izvori energije o kojima je ovisila grčka i rimska tehnika bili su čovjek i životinje, a to je ozbiljno ograničavalo razinu provođenja mehaničkih operacija. Heronovo »automatsko kazalište« pokazuje da je ideja automatizacije bila poznata antičkom svijetu. No dok je lutkice tog kazališta mogla pokretati energija utega, naprosto nije bilo načina da se ta ideja realizira u stvarnom životu i to nije pokušao ni Heron ni itko drugi.

No komparativni uspjeh tehnike u nekim poljima upućuje na još jednu stvar. Kad je u pitanju bila moć ili prestiž vladara, tehničari nije nedostajalo ohrabrenja. Ali u velikoj mjeri vrijedi i obrat: kad se nije radilo o prednostima za bogate pojedince, tehnika je obično zanemarivana. Zapanjuje kontrast između vještina koje su rasipane, primjerice, u izradi finih predmeta od kovine i relativno grubih postupaka koji su tijekom čitave antike korišteni za dobivanje kovina. U proizvodnji tkanina i keramike također nalazimo izvanredne izrađevine, ali je malo pozornosti posvećeno problemima masovne proizvodnje. Ukratko, ljudi antike su, kad god su mogli, pretvarali svoja umijeća u umjetnost, ali nisu, uz par iznimki, pokušavali načiniti od njih industriju. Moguće je upitati se zašto se u antici nije dogodila industrijska revolucija. Odgovor je, čini se, da za to nije bilo potrebe, onodobni načini proizvodnje i gospodarstvo utemeljeno na robovlasništvu su zadovoljavajuće održavali postojeće stanje stvari. Ondašnjem mentalitetu je posve strana kapitalistička ideja profita kao cilja kojem treba težiti. Isto vrijedi za ideju da se tehniku može ili treba iskoristiti u tom smjeru. U antici je industrijska revolucija bila doslovno nezamisliva.

Ni srednji vijek nije među svoje vrijednosti ubrajao tehnički napredak. Srednji vijek je dao malo originalnih izuma, a većina izuma je preuzeta iz antike ili iz Kine. No od 11. stoljeća se ipak opaža značajan tehnološki napredak i razvoj, koji je, doduše, bio više kvantitativan nego kvalitativan. Prije se radi o većoj raširenosti alata, strojeva i tehnika poznatih iz antike, no o izumiteljstvu. Poticaj za napredak tehnike postojao je od početka srednjega vijeka. Kroz cijeli srednji vijek postoji kronični nedostatak radne snage. Nije više bilo robova, a plemići su trebali sve više zemlje, koja ne znači mnogo bez seljaka, kojih pak nikad nije bilo dovoljno. Tu su srednjovjekovni seljaci i radnici mogli profitirati od naslijeđa antičkih tehnika i dodataka koje su im dodali Arapi. Akvadukti i kupke su nestali, ali su mlinovi i kovačnice opstali. Rast trgovine i poboljšavanje tehnika proizvodnje i transporta vukli su društvo u smjeru nove ekonomije, a tehnički aspekt te gospodarske revolucije bio je važan faktor u stvaranju nove znanosti. Neki povjesničari smatraju da su tehničke promjene koje su se zbile u srednjem vijeku najvažniji doprinos srednjega vijeka razvoju moderne znanosti.

Najdojmljiviji primjer srednjovjekovne mehanizacije je razvoj strojeva tjeranih snagom vode i njihovo uključivanje u tkanje seoskog života i europskog društva općenito. Vodenica je antički izum, no može ju se smatrati srednjovjekovnom napravom jer je po svemu što znamo tek u srednjem vijeku ušla u široku uporabu. Prema »Domesdayevoj knjizi«, popisu (nepotpunom!) imovine u Engleskoj napravljenom po naredbi Vilima I. (Osvajača), u Engleskoj su 1086. radila 5624 mlina, dok ih je stoljeće ranije zabilježeno manje od 100. U jednom francuskom okrugu (Aube) u 11. stoljeću je radilo 14 mlinova, u 12. stoljeću 60 mlinova, u 13. stoljeću 200 mlinova. U Pikardiji, na sjeveru Francuske, je 1080. radilo 40 mlinova, a 1175. već njih 245.

Mlin je od samoga početka integralna odlika feudalne ekonomije, nalazi se na gotovo svakom plemićkom posjedu i gospodar ga dobro koristi zahtijevajući da svi njegovi kmetovi melju u njemu za određenu naknadu. Mlinovi nisu bili ograničeni samo na mljevenje žita. Oni su otvorili mogućnost šire uporabe snage vodenoga toka. Za pretvaranje rotacijskog u recipročno gibanje korištene su dvije naprave, obje, čini se, podrijetlom iz Kine: čekić koji podiže zupčanik učvršćen na osovinu mlinskog kola i koljenasta osovina, koja je također mogla pretvoriti recipročno gibanje u kružno. Vodeno kolo je tako pokretalo različite strojeve, poput pilana, mlinova i različitih čekića. Vodenice su rabljene za valjanje sukna, gaženje mjhova, kovanje željeza, piljenje drveta. Cisterciti, red osnovan u Burgundiji 1098., su podizali vodenice za mljevenje žita, vodenice za valjanje sukna, strojeve za pletenje debelog užeta, kovačnice i peći za željezo u kojima su vodenice pokretale mjhove, tjeske za vino, varionice piva, staklane. Jedna od najranijih raširenih industrijskih primjena vodenice bilo je valjanje sukna. Valjanje sukna je jedan korak u izradi vunene odjeće, kojim se vunena tkanina čisti i čini gušćom. Prije primjene vodenice izvodilo se gaženjem nogama, a potom teškim drvenim batovima koji su se podizali i spuštali vrtnjom vodeničkog kola. Proizvodnja užadi od konoplje zahtijeva sličan postupak, kojim se razbijaju osušene stabljike i oslobađaju vlakna. Uporaba vodenice u tu svrhu je dokumentirana

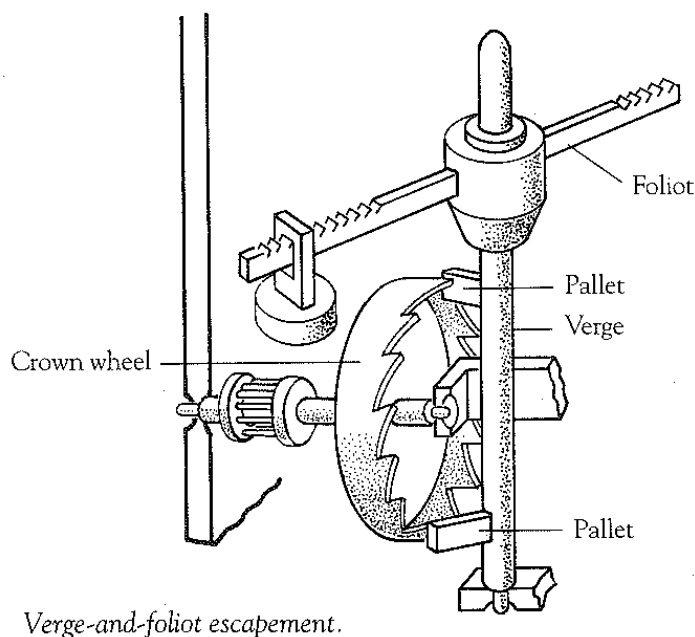
u jugoistočnoj Francuskoj oko 900. godine. U 14. stoljeću grad Lucca u Toskani je već imao tvornicu svile s 480 vretena pokretanih vodom.

Korištenje vodenice u zanatske ili čak industrijske svrhe je veliki tehnički napredak srednjega vijeka. Mlinove je trebalo graditi i održavati, a to većina seoskih kovača nije znala. Stoga je nastao zanat graditelja mlinova, koji su putovali te gradili i popravljali mlinove. Ti su ljudi bili prvi mehaničari u modernom smislu te riječi. Znali su kako izrađivati zupčanike i kako oni rade, znali su baratati branama i ustavama. Njihov je zanat postao riznica znanja i umijeća iz koje je renesansa i kasnija industrijska revolucija stjecala obrtnike.

MEHANIČKI SAT

Krajem 13. stoljeća su u Europi načinjeni prvi mehanički satovi, koji su koristili zapinjač i uteg kao pogon, a javljaju se na crkvenim tornjevima u Engleskoj, Francuskoj i Italiji. Jedan od najstarijih mehaničkih satova je sat bez brojčanika iz 1283. godine, postavljen u engleskoj opatiji Dunstable (Bedfordshire). Prvi mehanički satovi bili su veliki željezni mehanizmi smješteni u tornjevima. Jedan takav sat je instaliran u Milanu 1309. godine. Taj sat nije imao kazaljke niti je sam pokretao zvona, već je naprosto upozoravao zvonara kad treba potegnuti konop zvona. Prvi sat koji je automatski zvonjavom označavao satove instaliran je 1335., također u Milanu. Do 1370. diljem Europe je bilo instalirano barem 30 takvih satova. Često se kaže da je pojava mehaničkog sata pokretanog utezima odlučujući trenutak u hodu Europe prema preuzimanju mjesta predvodnika svjetske tehnike.

Utezi su kao izvor gibanja bili odavno poznati, a i zupčanici su postali obična stvar europskim obrtnicima. No da bi se učinak gravitacijske sile preveo u kontrolirano gibanje bilo je potrebno neko sredstvo koje bi upravljalo spuštanjem utega, koji prepušten sam sebi pada ubrzano. Danas se većina povjesničara slaže da je europski zapinjač izumljen u sjevernoj Italiji u drugoj polovici 13. stoljeća, a u engleskoj literaturi je poznat kao »verge-and-foliot« (vreteno s vagom):



Glavni dijelovi ovog zapinjača su:

- 1) krunasto kolo: uspravno kolo s trokutnim zupcima – ravnima s jedne strane, a kosim s druge – smještenim duž oboda kola i usmjerenim okomito na ravninu kola (poput lista pile svijenog u krug);
- 2) vreteno s izbojcima («verge»): osovina smještena uz krunasto kolo, paralelno s ravninom kola; na osovinu su učvršćena dva pločasta izbojka, okomita na os osovine i jedan na drugog, smještena tako da ulaze među zupce na suprotnim stranama krunastoga kola, jedan na gornjoj strani, a drugi na donjoj.
- 3) vaga («foliot»): motka učvršćena poprečno na vrhu vretena, s utezima na obje strane.

Krunasto kolo je učvršćeno na horizontalnoj osovini. Spuštanje utega vrti osovinu i kolo. Kad se kolo malo zakrene jedan od njegovih zubaca zahvati gornji izbojak na vretenu – zubac ravnim dijelom udari u izbojak – što trenutno zadrži kolo. Kako zubac kola gura gornji izbojak, zakrene se vreteno s izbojcima i na njega učvršćeni *foliot* s utezima, tako da sada zubac na dnu kola zahvati donji izbojak vretena, što opet trenutno zadrži kolo, koje gurajući donji izbojak zakreće vreteno i *foliot* u suprotnom smjeru i proces se ponavlja. Tako se dobije stalno »tik-takanje« mehanizma – dva izbojka vretena naizmjenice zaustavljaju vrtnju krunastoga kola, *foliot* se njiše amo-tamo, a kolo »klikla« u jednolikim intervalima vremena. U svrhu reguliranja hoda sata brzina »klikanja« se može povećati ili smanjiti pomicanjem utega na krajevima *foliota* (povećavanje ili smanjivanje momenta tromosti).

Većina srednjovjekovnih satova nije bila osobito precizna, tijekom dana su kasnili ili žurili poprilično minuta (spuštanje utega nije jednoliko!). Isprva se zbog toga nitko nije uzrujavao, budući da su tadašnja mjerila točnosti bila labava. Do tad su već astronomi podijelili sate na 60 minuta (što je Babilonsko naslijeđe), no srednjovjekovni su ljudi bili navikli na promjenljive zimske i ljetne sate, koji su slijedili ritam promjene raspoložive dnevne svjetlosti. No mehanički je sat postupno nametnuo sustav jednakih sati, potičući ljude da počnu vremenski uređivati mnoge djelatnosti koje dotad nisu bile tako uređene. U »tekstilnim« gradovima Flandrije satovi su tukli radne sate tekstilnih radnika. Gradski je sat postao instrument gospodarske, društvene i političke dominacije, kojim su rukovali trgovci koji su upravljali gradom. Prvi kućni satovi počeli su se izrađivati po uzoru na javne satove već sredinom 14. stoljeća.

U svezi sa srednjovjekovnim satovima važno je naglasiti da su oni bili prvi strojevi u cijelosti načinjeni od metala. Time ustanovljena tradicija precizne obrade metala odigrala je ključnu ulogu u izradi strojeva za proizvodnju tekstila tijekom industrijske revolucije. Urarski obrt postao je u renesansi za znanost ono što je mehaničarski postao za industriju – plodan izvor ingenioznosti i stručnosti, a kasnije, u 17. stoljeću, mehanički je sat postao metafora svemira.

U antici i srednjem vijeku strojevi su kao artefakti smatrani irelevantnima za filozofiju prirode i u svakom slučaju daleko ispod dostojanstva znanosti te im učenjaci općenito nisu poklanjali gotovo nikakvu pozornost. U renesansi je pak povećanje opsega proizvodnje za tržište i trgovine dovelo do velikog kvalitativnog i kvantitativnog napretka tehnike i razvoja građanskoga društva, koje je, vidjeli smo, tehniku i tehničare cijeno

više nego bilo koje drugo prije njega. Opaža se prava eksplozija mehaničkih naprava, stvarnih i zamišljenih. Primjerice, sat nalik gotičkoj katedrali, izrađen između 1429. i 1435. za burgundskoga vojvodu Filipa Dobroga, najstariji je očuvani sat s pogonom na oprugu. Novi pogon na oprugu omogućio je izradbu manjih stolnih satova, koji su izrađivani, primjerice, u Augsburgu i Nürnbergu u 16. stoljeću. Daljnjim smanjivanjem dimenzija omogućeno je nošenje sata na lancu oko vrata ili u torbici za pojasom. Izradba prvih osobnih satova, preteča džepnoga sata, pripisuje se nürnberškom bravaru Peteru Henleinu oko 1510. godine. Tako su mehaničke naprave privlačile sve više pozornosti i u očima ljudi postupno stjecale sve veću vrijednost.

2. Stroj kao metafora svijeta

Razvoj tehnike i društva tijekom renesanse doveo je do toga da su u 17. stoljeću strojevi postali sveprisutni i cijenjeni. Time su sazreli uvjeti da neki učenjaci stroj proglašavaju metaforom svijeta, radikalno raskidajući s aristotelskom i platoničkom tradicijom. Tako čak i Kepler, duboko uronjen u mistiku, naposljetku povezuje svemir sa strojem. Vidjeli smo da u kasnijim djelima odbacuje metaforu svemira kao božanskog organizma u korist metafore svemira kao sata: različita gibanja koja se događaju u svemiru su uzrokovana jednostavnim djelatnim tvarnim silama, baš kao što su gibanja u satu naprosto rezultat gibanja utega. Robert Boyle (1627. – 1691.) je također vjerovao da je svemir nalik velikom pokretnom stroju: da bismo objasnili pojave koje očituju planeti »moramo pribjeći [...] teorijama u kojima su glavni alati gibanje, broj, situacija i druga matematička i mehanička svojstva tijela«. Thomas Hobbes (1588. – 1679.) se pitao: »Zašto ne bismo rekli da svi automati (strojevi koji se sami pokreću pomoću opruga i zupčanika, poput sata) imaju *umjetni život*? Jer što je srce nego opruga; što su živci nego mnoge žice; što su zglobovi nego zupčanici?«.

U *Raspravi o čovjeku* (dovršenoj 1633., a objavljenoj 1644.) René Descartes kaže: »Vidimo da satovi, umjetne fontane, mlinovi i drugi slični strojevi, premda ih je načinio čovjek, imaju sposobnost da se gibaju sami od sebe na mnogo različitih načina [...] Uistinu, živci [životinjskog] stroja kojeg opisujem mogu se usporediti s cijevima tih fontana, njegovi mišići i tetive s različitim napravama i oprugama koje služe da ih pokrenu«. Ranije filozofije su prikazivale prirodu kao organizam. Descartes okreće stvari opisujući organizme kao mehanizme. U njegovom svemiru čovjek je jedino živo biće koje posjeduje i tijelo i dušu. No ni za čovjeka duša nije izvor života i sve organske funkcije se opisuju čisto mehanistički. Ostale životinje, lišene racionalne duše, su naprosto veoma složeni strojevi. Descartes kaže da kad bi postojali automati »koji imaju sve organe i vanjsko obličje majmuna ili neke druge životinje bez razuma, ne bismo ni na koji način mogli utvrditi da oni nisu iste naravi kao te životinje«.

U 17. stoljeću je upućivanje na satove, mlinove, fontane i hidrauličke naprave stalno i ustrajno. Stoljećima je prevladavala zamisao da svemir nije tek stvoren za čovjeka, već i *nalik* njemu. Nauk da su mikrokozmos i makrokozmos slični je doveo do antropomorfnog stava o prirodi. Mehanika je,

međutim, odbacila svaki pokušaj izučavanja prirode iz antropomorfne perspektive. Oni koji su pristajali uz metaforu svijeta kao stroja vjerovali su da je njihova metoda toliko moćna da se može primijeniti na sve aspekte zbilje: ne samo na neživu prirodu, već i na svijet živih bića, ne samo na nebeska gibanja i padanja tijela, već i na sferu ljudske percepcije i emocija. Mehanizacija se ticala i fiziologije i psihologije. Mehanizacija nije bila tek metoda. Ona je odbacila kao neznanstvena objašnjenja koja su zazivala duhove ili životne sile. Ona se razvila – i to je tada bilo shvaćeno i priznato – u istinsku filozofiju.

Početak 17. stoljeća su se filozofska i matematička tradicija istraživanja prirodnih pojava približile, ali još uvijek se radilo o dva različita pristupa prirodi, s različitim metodama i ciljevima. Očekivano su filozofski temelj moderne fizike, filozofsku konkretizaciju metafore svijeta kao stroja, razradili filozofi: René Descartes (1596. – 1650.) i Pierre Gassendi (1592. – 1655.)

3. Pierre Gassendi

Kako funkcionira svjetski stroj? Što su njegovi zupčanici, osovine, opruge? Kako metafori svijeta kao stroja dati konkretan oblik? Očigledan kandidat za takvu konkretizaciju je antički atomizam. Renesansa je, vidjeli smo, općenito u Europi oživjela bogatstvo antičke filozofske misli, a u sklopu tog pokreta je i antički atomizam postao bolje poznat, nakon što je, kao što smo već rekli, Giovanni Francesco Poggio Bracciolini 1417. godine otkrio primjerak izgubljenog i zaboravljenog Lukrecijeva spjeva *O naravi stvari*. No u renesansi je zanimanje za taj tekst bilo više literarno, a mnogo manje filozofsko. U renesansi su Platon i Aristotel još uvijek glavni igrači na filozofskoj sceni: kao glavna alternativa još uvijek dominantnom aristotelizmu razvija se i nudi platonizam u specifičnoj formi renesansnoga naturalizma. Atomizam je pak kao konkretizaciju metafore svijeta kao stroja izložio Pierre Gassendi u djelu *Syntagma philosophicum*, objavljenom nakon njegove smrti, 1658. godine.

Gassendi u velikoj mjeri prihvaća Epikurov atomizam te smatra da svijet čine nedjeljive čestice tvari – atomi – i praznina te da su sve prirodne pojave posljedica gibanja atoma. Svojstva atoma su veličina, oblik i, kako je inzistirao Epikur, težina. No Gassendi ne prihvaća Epikurov nauku o »krivudanju« atoma. Nadalje, Gassendijev atomizam se po jednom važnom elementu razlikuje od antičkoga. Po antičkom atomizmu je kozmos, uređeni svijet u kojem živimo, tvorevina nastala slučajno: atomi se u beskonačnom vremenu i beskonačnoj praznini gibaju deterministički, ali nasumično i slučajno su se složili u baš ovakav svijet s baš ovakvim svojstvima. Po Gassendiju pak uređeni svijet je tvorevina koju je stvorio Bog. Bog je u trenutku stvaranja dao atomima slobodno gibanje u praznini i nakon toga se oni gibaju nasumično i odbijaju pri sudarima.

Gassendijevi atomi imaju veličinu i oblik, drugim riječima prostorno su protegnuti, no protežnost nije njihova bit, protežnost nije ono što atom čini atomom. Gassendi smatra da je spoznaja biti stvari nedostupna čovjeku. Bit stvari može poznavati samo Bog. Tako Gassendi nudi novu definiciju znanosti.

Priroda nije posve otvorena ljudskom razumu, čovjek je može poznavati samo izvanjski, samo kao pojave. Jedina znanost dostupna čovjeku je opis pojava. No Gassendijeva rasprava o metodi znanosti je bila jedna stvar, a njegova filozofska praksa nešto drugo. Premda se zalaže za ograničavanje znanosti na opis pojava, to ga nije spriječilo da konstruira nevidljive mehanizme kako bi objasnio pojave. Primjerice, uvodi posebne čestice posebnih oblika da bi objasnio opazive kvalitete tijela, poput topline i hladnoće. Također uvodi čestice svjetlosti te čestice kojima objašnjava električne i magnetne pojave. No ustrajući na česticama i dopuštajući razlike samo u oblicima i gibanjima, ostao je vjeran mehaničkoj slici svijeta.

Već i u ovakvom vrlo sažetom izlaganju Gassendijeva nauka uočavamo neke važne općenite odlike filozofije koja se razvijala na temelju metafore svijeta kao stroja. Razmotrimo ih stoga potanje.

NUŽNOST OSLANJANJA NA MAŠTU

Razdoblje između Kopernika i Newtona je razdoblje makroznanosti i mikroznosti. Makroznanost, poput planetne astronomije i zemaljske mehanike, bavila se svojstvima i procesima koji su izravno opazivi i mjerljivi. U mikroznosti (u razvoju teorija svjetlosti, magnetizma, kapilarnosti, topline) su pak postulirana mikro-bića koja su načelno smatrana neopazivim. Galileo, Descartes, Boyle, Gassendi, Hooke, Huygens i Newton su raspravljali o bićima korjenito različitim od onih svakidašnjih makroskopskih. U tom je kontekstu uporaba metafora igrala važnu ulogu.

U mehaničkoj slici svijeta je tjelesni svijet zamišljen kao sustav tvornih čestica koje se gibaju. Istraživanje fizičkoga svijeta je stoga svedeno na najjednostavnije elemente – čestice i gibanja – i podrazumijeva isključivanje osjetilnih ili kvalitativnih elemenata. Posljedica toga je da se naše iskustvo tumači pomoću teorija. Prirodne pojave poput otpora zraka, trenja, različitih ponašanja pojedinačnih tijela i kvalitativnih svojstva sada se smatraju nevažnim za raspravu o filozofiji prirode ili se doživljavaju kao *ometajuće okolnosti* koje ne treba uzimati u obzir pri objašnjavanju tjelesnoga svijeta. Filozofi koji zastupaju mehaničku predodžbu svijeta više nisu bili fascinirani ni neposrednošću bliskih, svakidašnjih prirodnih pojava ni »stranim i neobičnim« stvarima koje su bile neodoljive renesansnim naturalistima i magičarima. Descartes se pita mora li svjetlost *kakva jest* na bilo koji način nalikovati našem *osjetu*, načinu na koji je mi osjećamo. Osjet dodira ni na koji način ne odgovara predmetu koji dodirujemo. Škakljanje ni na koji način nije slično peru koje ga izaziva. Upravo ta nesličnost nas prisiljava da zamislimo model. Descartes koristi analogije kao potkrjepu svojih mehaničkih teorija. Primjerice, slijepac koji »vidi« pomoću svog štapa ilustrira trenutno širenje svjetlosti.

Znanost se nužno morala odmaknuti od opazivog k neopazivom, a zadaća čovjekove mašte bila je zamisliti neopazivo na neki način sličnim opazivome. Znanost je prisilila čovjeka da se osloni na maštu. Gassendi kaže da kad opažamo privlačenje ili sjedinjavanje zamišljamo kuke i užad, nešto što hvata i nešto što je uhvaćeno; kad pak opažamo odbijanje ili razdvajanje zamišljamo nešto što bode i nešto što je ubodeno. Da bismo objasnili pojave koje su izvan dohvata naše osjetilne percepcije moramo *zamišljati* različite

instrumente za koje, premda nisu opazivi, moramo pretpostaviti da postoje. Robert Hooke u djelu *Micrographia* iz 1665. kaže da nam naša osjetila ne omogućuju da vidimo kako priroda stvarno funkcionira te se stoga nadamo da će nam mikroskop jednoga dana omogućiti da opažamo pravi ustroj tijela. U međuvremenu je čovjek, smatra on, prisiljen tapkati u mraku i putem »sličnosti i usporedbe« zamišljati prave uzroke stvari. Hooke želi reći da se unutrašnja struktura tvari i živih organizama opire opažanju pomoću ljudskih osjetila. Zbog tog ograničenja nužno je povlačiti analogije između učinaka hipotetskih tijela i učinaka do kojih dovode uzroci dohvatljivi osjetilima. Od *analogije učinaka* prelazimo na *analogiju uzroka*.

PRIRODNO I UMJETNO

Uzeti stroj za metaforu svemira značilo je smatrati strojeve modelima koji su u stanju pružiti najbolja objašnjenja, a strojevi su mogli biti ili oni koji uistinu postoje ili oni za koje se opravdano može reći da bi mogli postojati. Budući da svaki element (ili »dio«) stroja obavlja specifičnu funkciju i svaki »dio« je jednako nužan za djelovanje stroja, u svjetskom stroju ne može postojati hijerarhija dijelova. Niti jedna pojava nije više ili manje *plemenita* od drugih. Slika svemira kao divovskog sata je svrgnula tradicionalnu sliku svijeta kao neke vrste piramide, s najobičnijim stvarima na dnu i najplemenitijim na vrhu, gdje su najbliže Bogu.

Razumijevanje zbilje je zahtijevalo znanje o tome kako rade mali strojevi unutar velikog svjetskog stroja. Pierre Gassendi u djelu *Syntagma philosophicum* povlači jasnu analogiju između prirodnih predmeta i strojeva, tj. artefakata, umjetnih predmeta: »Istražimo prirodu na isti način na koji istražujemo stvari koje smo sami napravili [...] Iskoristimo anatomiju, kemiju i druga takva pomagala da bismo razumjeli tijela u mjeri u kojoj to možemo i da rastavljaajući ih saznamo od čega su građena i po kojim načelima«. Rekli smo već da je Gassendi tvrdio ograničenost, vremenitost i »fenomenološku« narav znanstvenoga znanja. Samo Bog može poznavati bit stvari. Čovjek može uistinu poznavati samo one pojave koje može prikazati pomoću modela ili one umjetne predmete (strojeve) koje je načinio vlastitim rukama.

No takav stav podrazumijeva istovjetnost proizvoda umijeća i proizvoda prirode. Štoviše, takav stav podrazumijeva odbacivanje tradicionalne definicije umijeća kao oponašanja prirode. Kad bi umijeće bilo tek oponašanje prirode ne bi nikad moglo dosegnuti savršenstvo prirode. Mehaničko umijeće je bilo shvaćeno kao pokušaj kopiranja prirodnih gibanja i stoga srednjovjekovni tekstovi često sugeriraju da su mehanička umijeća krivotvorine ili *adulterinae*. Iz tih je razloga shvaćanje svijeta kao stroja dovelo do promišljanja odnosa prirode i umijeća. Francis Bacon u djelu *De augmentis scientiarum* iz 1623. godine kritizira aristotelsku teoriju prema kojoj proizvodi prirode (primjerice stablo) imaju primarnu formu, a proizvodi umijeća (primjerice stol načinjen od stabla) tek sekundarnu formu: »čovjek se mora uvjeriti da se umjetne stvari ne razlikuju od prirodnih stvari po formi ili biti, već samo po djelatnom uzroku«. S time se slaže i Descartes: »Ne vidim nikakvu razliku između umjetnina i prirodnih tijela«, osim što su strojevi koje su načinili ljudi »dovoljno veliki da ih možemo zamijetiti našim osjetilima«, dok su »cijevi i

opruge koje čine prirodne objekte toliko sitne da posve promiču našim osjetilima«.

Poznavanje svršnih uzroka i biti bilo je rezervirano za Boga, kao stvoritelja ili graditelja svjetskog stroja, i uskraćeno čovjeku. Znanje o tome kako nešto načiniti ili veza između znanja i činjenja vrijedi i za čovjeka i za Boga. Bog razumije čudesni svjetski stroj zato što on *jest* urar. Čovjek može *uistinu* poznavati samo ono što je umjetno, tj. ono što je sam načinio. Marin Mersenne u djelu *Harmonie universelle* iz 1636. piše: »Teško je otkriti istinu u fizici. Budući da predmeti fizike spadaju u područje onoga što je stvorio Bog, ne iznenađuje što nismo u stanju naći njihove prave uzroke [...] Možemo otkriti istinu jedino o onim stvarima koje smo stvorili našim vlastitim rukama ili umom«.

MEHANIČKA SLIKA SVIJETA I VJERA

Filozofi 17. stoljeća koji su prihvaćali metaforu svijeta kao stroja bili su veliki štovatelji mehaničkog i atomističkog svjetonazora koji su izgradili Demokrit, Epikur i Lukrecije. Međutim, uglavnom su se jako oprezno ograđivali od heretičkih i ateističkih implikacija materijalizma te su izbjegavali filozofije koje poriču Božje stvaranje i pripisuju podrijetlo svemira nasumičnom slaganju atoma. Po njima slika svemira kao stroja podrazumijeva Strojara, a metafora svijeta kao sata podrazumijeva Urara.

Marin Mersenne (1588. – 1648.) se priklonio novoj znanosti smatrajući je obranom od velike prijetnje kršćanskoj vjeri i vrijednostima. Ta je prijetnja uključivala povratak »mističnim« temama, širenje hermetizma i stavove ukorijenjene u renesansnom naturalizmu. Vjerovao je da je prirodna magija, koja omogućuje čovjeku da čini »čuda«, veća prijetnja kršćanstvu nego nova filozofija utemeljena na metafori svijeta kao stroja. Smatrao je da se takva filozofija može pomiriti s vjerom. Osjećao je da hipotetska narav znanstvenoga znanja ostavlja prostor za religiju i kršćansku vjeru.

Robert Boyle (1627. – 1691.) je dijelio istu brigu. Dok je u djelu *About the Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis* iz 1655. godine isticao vrline atomističke filozofije, istodobno je nastojao utvrditi dvije granice. Prvo, granicu između sebe i epikurejaca i lukrecijanaca, koji su vjerovali da je svijet stvoren nasumičnim slaganjem atoma u praznini. Drugo, granicu između sebe i tzv. »modernih mehanista« (tj. kartezijanaca, Descartesa i njegovih sljedbenika – Descartesovu filozofiju ćemo prikazati u nastavku teksta) koji su smatrali da je Bog u početku uveo određenu količinu gibanja u sveukupnu tvar i da su različiti dijelovi tvari, uslijed svog vlastitog gibanja, bili u stanju samostalno oblikovati svijet. Boyleova korpuskularna filozofija ne smije se miješati ni s Epikurovom ni s Descartesovom. Boyle odvaja problem »nastanka stvari« od problema »kasnijeg tijeka prirode«. Bog se nije ograničio na to da pokrene tvar, već je vodio gibanja pojedinačnih čestica tvari tako da ih »udesi u svijet koji je oblikovao«. Kad je Bog jednom organizirao svemir i uspostavio »pravila gibanja i onaj red među tjelesnim stvarima koji nazivamo zakonima prirode« postalo je moguće ustvrditi da su pojave u svijetu »fizički stvorene mehaničkim djelovanjem dijelova tvari koji djeluju jedan na drugoga u skladu s mehaničkim zakonima«. Razlika između *podrijetla stvari* i *kasnijeg razvoja prirode* je veoma važna: oni koji izučavaju podrijetlo svemira bezbožno

tvrde da izvode svijet i konstruiraju teorije i sustave. Boyle je smatrao da sljedbenici Demokrita i Epikura, kao i kartezijanci, razvijaju ateističku i materijalističku verziju mehaničke filozofije. Što je drugo Descartes pokušao učiniti nego opisati nastanak svemira i ponuditi priču o nastanku svemira drukčiju od one u Knjizi postanka? Istina, Descartes tvrdi da opisuje zamišljeni svemir. No s druge strane često je tvrdio, primjerice, da znajući kako se fetus oblikuje u maternici i kako biljka raste iz sjemena znamo više no što bismo znali kad bismo poznavali samo dijete ili biljku. Štoviše, tvrdio je da isto vrijedi za svemir. Iz Descartesovih tekstova slijedi da znanost ne treba govoriti samo o svijetu, već i o tome kako je svijet nastao. Razlika spram Boylea po toj točki je radikalna. Prema Descartesovom stavu je sadašnji ustroj svijeta posljedica samo tvari, zakona gibanja tvari i vremena.

U odnosu na to pitanje su Newtonovi stavovi bili bliski Boyleovim. Newton je ogradio svoju filozofiju od potencijalno ateističkih i materijalističkih posljedica kartezijanizma. Tvrdio je, primjerice, da »slijepi udes« ne bi nikada mogao učiniti da se planeti gibaju na jedan te isti način u koncentričnim putanjama te da je začuđujuća jednolikost sustava planeta učinak »namjernog odabira«. Planeti se gibaju po orbitama zbog zakona gravitacije, ali se »izvorni i pravilni položaj tih orbita ne može pripisati tim zakonima: zadržavajući položaj Sunca, planeta i kometa može biti djelo jedino svemoćnog i inteligentnog Bića«. Prirodni zakoni počeli su djelovati tek *nakon* stvaranja svijeta. Newtonova znanost je bila iscrpni opis svemira kakav jest, Newton nije nikada prihvatio zamisao da su zakoni mehanike mogli *stvoriti* svijet. Bog je zadao zakone po kojima se svijet razvija, ali i *početno stanje svijeta*.

4. René Descartes

Kako smo već nagovijestili, konkretizaciju metafore svijeta kao stroja poprilično drukčiju od antičkoga atomizma je razradio René Descartes (1596. – 1650.) u djelu *Principia philosophiae* objavljenom 1644. godine. Descartes se zanimao za tehniku, izvodio je pokuse i bavio se matematikom. Štoviše, koristio je matematičke metode u svojoj optici i utemeljio je analitičku geometriju. No prije svega je bio filozof, i to vrlo važan filozof, jedan od začetnika novovjekovne filozofije, a mi ćemo ovom prilikom prikazati samo mali dio njegove filozofije, onaj koji je bitan za našu temu. Prema Descartesu zbilju čine dva bivstva, dvije supstancije: duh i tvar. Duh je misleća supstancija, supstancija koju određuje čin mišljenja. Tvar je pak supstancija koju određuje protežnost, bit tvari je protežanje u duljinu, širinu i visinu. Tvar je u osnovi definirana geometrijski. Te dvije supstancije su definirane tako da su posve različite i razdvojene. Duhu, mislećoj supstanciji, ne možemo pripisati niti jednu odliku tvari – ni protežnost ni mjesto ni gibanje, a tvari, protegnutoj supstanciji, niti jednu odliku duha.

Descartes je tvar definirao kao protežnost. Budući da se prostor također proteže u duljinu, širinu i visinu zaključuje da između prostora i tvari nema bitnih razlika: »Prostor ... i tijelo koje se nalazi u tom prostoru razlikuju se samo u našim mislima«. Jedina razlika između tvari i prostora koji ona zauzima je gibanje. Tvarni objekt je oblik prostora koji se može premjestiti s jednog mjesta na drugo bez gubljenja svojstava koja ga određuju. No ako

tvarni svijet čine samo *prostor* i *gibanje* tada je Descartesov svemir zapravo realizacija geometrije.

Oštro razdvajanje duha i tvari podrazumijeva isključivanje svih psihičkih značajki iz tvarnoga svijeta. U svemiru postoji samo gibanje i tvar i Descartesova fizika je strogo mehanistička. Spomenimo da Descartes ne prihvaća postojanje djelovanja na daljinu, posve u skladu s mehaničkom predodžbom svijeta. Svi neživi objekti mogu se opisati koristeći samo gibanje, veličinu, oblik i sastav dijelova. Priroda nije psihička niti se može tumačiti animistički. Zajedno sa simpatijama, antipatijama i okultnim moćima renesansnoga naturalizma iz tjelesnog svijeta su sada izbačene i kvalitete Aristotelove filozofije. Ništa ne jamči da bi zbilja trebala biti slična svijetu koji nam otkrivaju osjetila. Po Aristotelu tijelo izgleda crveno zato što na površini ima kvalitetu crvenosti. Tijelo osjećamo kao toplo zato što ima kvalitetu topline. Kvalitete uistinu postoje, a putem osjetila izravno dohvaćamo te kvalitete. Prema Descartesu nije tako. Reći da crvenost ili toplina postoje u tijelima znači projicirati naše osjete ne fizički svijet. Opaziva tijela su zapravo sastavljena samo od čestica tvari koje se gibaju i, osim protežnosti, sve njihove prividne kvalitete su samo osjeti koje tijela stvaraju u našim osjetilima i živčanom sustavu. Nama bliski svijet osjetilnih dojmova se tumači kao čista iluzija. Svijet je naprosto stroj, načinjen od inertnih tijela koja se gibaju po fizičkoj nuždi i koja su posve indiferentna na postojanje mislećih bića.

Uočimo da poistovjećivanje prostora i tvari ima nekoliko posljedica:

- i) jedinstvenost univerzalne tvari;
- ii) beskonačnost svijeta;
- iii) beskonačnu djeljivost tvari;
- iv) nepostojanje praznine (Descartesov svemir je *plenum*, popunjen prostor. Izjednačavanje tvari s protežnosti znači da svaki protegnuti prostor po definiciji mora biti popunjen materijom, bolje rečeno mora biti tvar. Praznina ne može postojati. »Praznina« među česticama tvari je posve popunjena drugim, sitnijim česticama tvari. Stoga svaka čestica koja se giba u takvom plenumu mora sudjelovati u zatvorenom krugu pokretne tvari, poput obruča koji se vrti oko osi, jer čestica koja se giba ulazi u prostor koji se u istom trenutku prazni. Uvođenje gibanja u plenum znači da u svemiru postoji beskonačno mnoštvo vrtloga).

Descartes je vjerovao da je tjelesna zbilja korpuskularna, ali se na dva načina udaljio od antičkih atomista: vjerovao je u beskonačnu djeljivost tvari i odbacivao je postojanje praznine.

Jedan od kamena temeljaca Descartesove filozofije prirode je bilo načelo inercije. U njegovoj filozofiji su sve prirodne pojave posljedica gibanja čestica tvari. No što uzrokuje gibanje? Tvar je po definiciji inertna supstancija lišena aktivnih principa, a gibanje ne slijedi iz protežnosti, stoga tvar očigledno ne može sama biti uzrok svog gibanja. U 17. stoljeću svi bi se složili, pa se slaže i Descartes, da je izvor gibanja Bog. U početku je Bog stvorio tvar i dao joj je gibanje. Što održava tvar u gibanju? Descartes odgovara da ništa nije potrebno da bi održavalo tvar u gibanju. Gibanje je *stanje* i kao svako drugo stanje u kojem se tvar može naći ono se održava sve dok ga neki vanjski uzrok ne promijeni. Uočimo da se Descartesova zamisao gibanja bitno razlikuje od tradicionalne Aristotelove. Za Descartesa gibanje nije *proces*, proces

sazrijevanja ili propadanja forme, već *stanje*, ontološki ekvivalentno mirovanju. Tijelo se ni na koji način ne mijenja time što miruje ili se giba. U pokušaju da posve i racionalno rekonstruira tjelesni svijet Descartes je došao do važne definicije pojma gibanja i jasno formulirao načelo inercije.

Descartes navodi tri zakona gibanja. Prva dva zakona su prvi jasan, potpun i točan iskaz načela inercije:

- i) Tijelo ne mijenja svoje stanje gibanja (ili mirovanja) sve dok ne sretne drugo tijelo; tijela koja miruju ne počinju se gibati sama od sebe, tijelo koje se giba nastavlja se gibati i nikad se samo od sebe ne zaustavlja.
- ii) Svi dijelovi tvari teže gibanju po pravcu sve dok ne sretnu druge dijelove tvari.
- iii) Ako neko tijelo koje se giba i koje naiđe na drugo tijelo ima manje moći da se nastavi gibati pravocrtno nego što drugo tijelo ima moći da mu se odupre, tada ono gubi svoj smjer ne gubeći ništa od svog gibanja, tj. ono se odbija; ako pak ima više moći, pokreće drugo tijelo i gubi onoliko gibanja koliko predaje tom tijelu.

Treći zakon je prilično neprecizan. Descartes ga koristi u istraživanju sudara, ali izvodi pogrešne zakone. Njegova analiza sudara nije bila uspješna, ali je postala ishodište za kasnije uspješnije pokušaje.

Descartes je, vidimo, smatrao da se u sudarima gibanje može prenijeti s jednog tijela na drugo, ali gibanje samo ostaje neuništivo. Ta ideja očuvanja gibanja se približava zakonu očuvanja impulsa (količine gibanja) koji je kasnije formuliran. Po Descartesu u svemiru ostaje onoliko gibanja koliko ga je bilo u času stvaranja svijeta: »ako se jedan dio tvari giba dva puta brže od drugog dijela, a taj drugi dio je dva puta veći od prvoga dijela, onda moramo smatrati da ima isto toliko gibanja u prvom koliko i u drugom dijelu«. U svim slučajevima kad se gibanje nekog dijela tvari smanjuje, razmjerno se povećava gibanje nekog drugog dijela tvari, ali Descartes ne kaže jasno kako se to događa. Uočimo da je količina gibanja za Descartesa razmjerna brzini i veličini tijela, u to vrijeme pojam mase tijela još nije bio oblikovan. Uočimo također da Descartes ne spominje smjer gibanja: »gibanje« razmatra kao skalarnu veličinu.

Valja snažno naglasiti jednu odliku Descartesove filozofije prirode, koja je atomističkoj slici svijeta dala posve novu dimenziju. Descartes je antički atomizam unaprijedio u teoriju gibanja čestica. Za objašnjenja antičkih atomista su bitne bile čestice i njihovi različiti oblici, ali o tome kako se te čestice gibaju kroz prazninu oni su govorili samo vrlo općenito. Dok je u objašnjenjima antičkog atomizma način gibanja čestica ostao uglavnom neodređen, Descartes je posebnu pozornost posvetio upravo *zakonima gibanja* čestica, pod utjecajem svog prijatelja Isaaca Beeckmana (1588. – 1637.). Rezultat je bila sveobuhvatna filozofija prirode, koja se od antičkoga atomizma razlikovala po mnogo čemu, ali je uistinu bitna razlika bilo uvođenje zakona gibanja. Tim inzistiranjem na zakonima gibanja se ovaj novi oblik korpuskularne, tj. čestične, teorije svijeta približio novom obliku tradicije matematičkog pristupa prirodnim pojavama. Naime, početkom 17. stoljeća, istodobno sa spomenutim transformiranjem filozofskoga pristupa prirodnim pojavama, transformirana je i tradicija matematičkoga pristupa prirodnim pojavama, kroz Keplerovo i Galileijevo istraživanje *zakona gibanja* (tri Keplerova zakona gibanja planeta i Galileijev zakon slobodnoga pada) pomoću

mjerenja i matematike (o Galileiju ćemo ubrzo reći više). Zapravo, u tom je trenutku tradiciji matematičkoga pristupa prirodnim pojavama i tradiciji filozofskoga pristupa prirodnim pojavama zajedničko bilo jedino to nastojanje da se precizno izraze zakoni gibanja, no time su ove dvije tradicije ipak dobile dodirnu točku.

5. Galileo Galilei

Za razliku od Descartesa i Gassendija Galileo Galilei (1564. – 1642.) je pripadao matematičkoj tradiciji bavljenja prirodnim pojavama. Već 1585. je napustio nedovršeni studij medicine, počeo održavati privatne poduke iz matematike i baviti se praktičnim mehaničkim problemima. Primjerice, poboljšao je postojeću vagu za određivanje specifičnih težina, o čemu je napisao knjižicu *La Bilanceta* (1586.). Ujesen 1589. je dobio mjesto profesora matematike i astronomije na Sveučilištu u Pisi, gdje je ostao tri godine.

DE MOTU, PRVI TEKST O GIBANJU

Oko 1587. Galilei je napisao tekst, vjerojatno za potrebe privatne poduke, u kojem raspravlja o različitim problemima fizike i kozmologije. Djelo je očekivano napisano po ondašnjim standardima i u njemu nema ni originalnosti ni isticanja uloge matematike, koje će obilježiti njegova kasnija djela. Galilei u tom djelu spominje kopernikansku astronomiju, ali je odlučno odbacuje i izlaže argumente kojima se dokazuje da je Zemlja smještena u središtu svijeta. No desetak godina kasnije, 1597., Galilei u jednom pismu kaže da kopernikansku astronomiju i kozmologiju smatra »znatno vjerojatnijom« od ptolemejsko-aristotelске. Vidjeli smo prije da je jedan od glavnih problema Kopernikove kozmologije bilo objašnjenje zemaljskih gibanja, napose pitanja zašto tijela na Zemlji padaju i zašto padaju upravo na način na koji padaju (»argument tornja«, vidi tekst *Aristotel*). Vjerojatno je stoga Galilei, kao obraćenik na kopernikanizam, počeo istraživati gibanja, a napose slobodni pad. Aristotelova teorija gibanja, tada jedina postojeća, nije se mogla spojiti s Kopernikovom kozmologijom u kojoj se Zemlja giba i ta se kozmologija mogla načiniti uvjerljivijom jedino razvojem odgovarajuće nove teorije gibanja.

Galilei je oko 1592. godine dovršio svoj prvi spis o gibanju – *De motu* – ali ga nikad nije objavio. U spisu se između ostaloga bavi primjenom Arhimedovog načela na vertikalna gibanja tijela u fluidima. Razmatra brzine različitih tijela u istom sredstvu, istih tijela u različitim sredstvima i različitih tijela u različitim sredstvima. Tu nije nastojao dokazati da sva tijela padaju istom brzinom, već samo da je brzina padanja razmjerna razlici između gustoće tijela i gustoće sredstva kroz koje ono pada, što znači da bi tijela jednake gustoće u zraku trebala padati jednakom brzinom, neovisno o njihovim težinama. Pritom je koristio teoriju impetusa (vidi tekst *Aristotel (2. dio)*), tumačeći impetus pomoću Arhimedove statike fluida, te je pokušao konstruirati egzaktnu kvantitativnu dinamiku kao dopunu kvantitativne Arhimedove statike. Također razmatra gibanje niz kosinu, koristeći Hiparhovo

(2. st. pr. Kr.) shvaćanje ubrzanja. Hiparhova hipoteza nam je poznata preko Simplicija, koji piše:

Hiparh, s druge strane, u svom djelu *Tijela nošena prema dolje vlastitom težinom* kaže da je u slučaju zemlje bačene uvis uzrok gibanja prema gore sila bacanja, sve dok je jača od sklonosti tijela ka gibanju prema dolje; sa smanjivanjem te sile (1) brzina gibanja prema gore pada na nulu, (2) tijelo se zatim giba prema dolje zbog utjecaja njegova vlastita unutrašnjeg impulsa, premda početna sila bacanja još nije nestala i (3) s daljnjim smanjivanjem početne sile tijelo pada sve brže, a najbrže kad ona posve iščezne. Hiparh također tvrdi da isti uzrok djeluje kad se tijelo ispusti i pada s neke visine. Jer, po njemu, zadržavajuća sila ostaje u tijelu do neke točke i njome se objašnjava sporije gibanje na početku.

Prema Hiparhu je ubrzanje privremeno. Kad se sila koja djeluje protiv gravitacije iscrpi, tijelo nastavlja padati jednolikom brzinom. To svakako nije bila dobra osnova za Galilejeva razmatranja. No Galilei je napustio teoriju gibanja koju je razmatrao u ovom tekstu kad je uvidio da ona ne može riješiti problem koji tvrdnji da se Zemlja giba nameće argument tornja.

Taj je rad bio početak dugog puta. Tijekom sljedećih pola stoljeća Galilei se bavio različitim problemima. Njegove su se teorije mijenjale, kako je u svoj rad uključivao popravke, dublje razumijevanje problema i nove pojmove. No ono što se nije promijenilo bilo je više ili manje prešutno prihvaćanje pristupa i metode »božanskog Arhimeda«.

ZAKON SLOBODNOGA PADA

Krajem 1592. Galilei je dobio mjesto profesora na Sveučilištu u Padovi, gdje je ostao do 1610. Do otprilike 1602. godine Galilei se u Padovi mnogo više bavio praktičnim problemima nego teorijskim istraživanjima. Za Arsenal u Veneciji je rješavao različite praktične probleme, primjerice problem položaja vesala na galiji te je izumio, izrađivao i prodavao različite naprave. Potaknut takvim problemima je 1602. dovršio prikaz statike pod nazivom *Mehanika* te se potom vratio ranijem razmatranju gibanja.

Sada se usredotočio na gibanje niz kosinu i u analizi isprva polazi od dvije jednostavne, ali pogrešne pretpostavke iz djela *De motu*: (1) ubrzanje se može zanemariti i (2) jednolika brzina gibanja niz kosine iste visine je obrnuto razmjerna njihovim duljinama. Krajem 1602. je svoje rezultate iznio u pismu Guidobaldu del Monte (1545. – 1607.). Uz te rezultate spominje pretpostavku da tijelo pušteno u gibanje s bilo koje točke vertikalne kružnice doseže najnižu točku u istom vremenu. Del Monte to provjerava pokusom i nalazi da pretpostavka ne stoji. Galilei odgovara da je takav rezultat pokusa možda posljedica nepravilnosti plohe i trenja, što bi se moglo ukloniti tako da se umjesto plohe rabi dugo njihalo. Po svemu sudeći se čini je da je izvodio stvarne pokuse i da je u tome postao dobar, premda u istom pismu primjećuje da se ne može očekivati apsolutno slaganje rezultata mjerenja i matematičkog prikaza.

Galileija se u svezi s njihovom dojmilo to što period titranja ne ovisi o kutu otklona njihala. Premda je to samo približno točno, činilo se

paradoksalnim da je njihalo u stanju prilagoditi svoju brzinu tako da mu treba isto vrijeme da prijeđe sve manje i manje lukove kako se njegovo gibanje prigušuje. Vjerojatno su ga pokusi s dugim i teškim njihalom koje je izvodio tijekom 1602. uvjerali u važnost ubrzanja pri slobodnom padu i skrenuli mu pozornost na održavanje jednom uspostavljenog gibanja. To ga je ubrzo dovelo do posve novoga polazišta za izučavanje gibanja, koje je zamijenilo njegovo ranije umovanje.

Potaknut tim zapažanjem Galilei je 1603. počeo istraživati ubrzanje. Sljedeće godine je smislio kako mjeriti put koji tijelo prelazi tijekom ubrzanog gibanja, vjerojatno tražeći vezu između porasta brzine i prijeđenog puta. U tu je svrhu pustio kuglicu da se kotrlja niz utor izdubljen u dasci duljine oko 2 m, nagnutoj manje od 2° . Duž utora je postavio prepreke od žice u koje kuglica udara te je sluhom ocjenjivao ritam i pomicao žice tako da dobije iste vremenske intervale od otprilike pola sekunde. Tako dobivene razmake žica je potom mjerio u jedinicama od otprilike 1 mm. Na temelju toga je ustanovio da put koji kuglica prijeđe u uzastopnim jednakim vremenskim intervalima raste kao neparni brojevi: ako u prvom vremenskom intervalu kuglica prijeđe put od jedne jedinice, u drugom prijeđe put od 3 jedinice, u trećem put od 5 jedinica, u četvrtom put od 7 jedinica itd. To pak znači da ukupni prijeđeni put raste kao kvadrati prirodnih brojeva: do kraja prvog vremenskog intervala kuglica prijeđe put od jedne jedinice, do kraja drugog intervala put od 4 jedinice, do kraja trećeg intervala put od 9 jedinica, do kraja četvrtog intervala put od 16 jedinica itd. To je ustvari zakon slobodnoga pada – prijeđeni put razmjernan je kvadratu protekloga vremena – i time je po prvi put neko stvarno »zemaljsko« gibanje (tj. gibanje koje nije gibanje nebeskih tijela) opisano kvantitativno.

Nakon što je eksperimentalno ustanovio zakon slobodnoga pada Galilei je brzo napredovao bez daljnjih pokusa. Kad je jednom matematika povezana sa stvarnim mjerenjima, onda joj se dalje može samo vjerovati. Naglašava da su sve prijašnje rasprave filozofa o »pouzdanosti matematike« bile odvojene od stvarnih mjerenja. Vraća se na probleme koje je ranije aproksimativno rješavao i sada ih razmatra u novom svjetlu. No njegovi novi i ispravni zakoni slobodnoga pada nisu mu smjesta omogućili da nađe ispravnu pretpostavku za matematički izvod tog zakona. Galilei je do točnih zakona slobodnoga pada došao putem mjerenja, ali kao sljedbenik Arhimeda želi te zakone uklopiti u strogu aksiomatsku strukturu. Problem su pritom bila mjerenja za odabir aksioma, koji po Aristotelu moraju biti prirodni i očigledni. Tako Galilei kao polazni aksiom odabire pogrešnu tvrdnju da je brzina tijela u slobodnom padu razmjerna prijeđenom putu. No brzina pri slobodnom padu nije razmjerna prijeđenom putu, već kvadratnom korijenu prijeđenoga puta. U pismu od 16. listopada 1604. Galilei o tome piše prijatelju Paolu Sarpiju (1552. – 1623.):

Razmišljao sam o problemima gibanja, pri čemu mi je, da bih dokazao neke pojave koje sam uočio, nedostajalo apsolutno nedvojbeno načelo. Da bih takvo načelo postavio kao aksiom došao sam do tvrdnje koja mi se čini posve prirodnom i očiglednom; polazeći od te tvrdnje mogu dokazati sve drugo, prije svega to da su udaljenosti prijeđene pri prirodnom gibanju [slobodnom padu] u dvostrukom razmjeru s vremenom [razmjerne kvadratu vremena] i

da se prema tome udaljenosti prijeđene u jednakom vremenu odnose kao neparni brojevi počevši od jedinice, kao i neke druge stvari. Načelo je sljedeće: brzina tijela koje se prirodno giba razmjerna je udaljenosti od polazišta.

Galilejev argument za odabir takvog aksioma je bio sljedeći: kad se tijelo ispušta s različitih visina, učinak koji proizvodi je razmjernan visini s koje je ispušteno, a budući da se pritom mijenja jedino brzina tijela, brzina tijekom padanja mora biti razmjerna udaljenosti prijeđenoj tijekom padanja. No zapravo učinak ovisi o kvadratu brzine (kinetička energija!) i Galileiju je trebalo više od tri godine da uvidi svoju pogrešku.

Vidjeli smo prije (tekst *Aristotel (2. dio)*) da je u 14. stoljeću skupina matematičara povezanih s Merton Collegeom u Oxfordu (tzv. »Mertonovci«) razvila tradiciju matematičke raščlambe gibanja. Između ostaloga, precizno su definirali jednoliko ubrzano gibanje kao gibanje *s jednakim prirastima brzine u jednakim intervalima vremena* te su razvili niz kinematičkih teorema, poput teorema da je put prijeđen pri jednoliko ubrzanom gibanju jednak putu prijeđenom brzinom koja je jednaka polovici konačne brzine. Nikola iz Orezma je pak razvio metodu grafičkoga prikaza gibanja te je geometrijskim metodama dokazao taj teorem. U drugom mertonском teoremu, *teoremu o udaljenosti*, uspoređuju se putovi prijeđeni tijekom različitih faza jednoliko ubrzanog gibanja. Teorem kaže da tijekom druge polovice trajanja jednoliko ubrzanog gibanja tijelo prijeđe put trostruko veći od puta koji prijeđe tijekom prve polovice trajanja gibanja. Nikola iz Orezma je na isti način dokazao i taj teorem i poopćio ga: »... kad se predmet podijeli na jednake dijelove ... tada odnos parcijalnih kvaliteta, tj. njihov međusobni odnos, odgovara nizu neparnih brojeva, gdje je prvi 1, drugi 3, treći 5 itd«. Drugim riječima, primijenimo li to na jednoliko ubrzano gibanje i podijelimo li trajanje tog gibanja na jednake vremenske intervale, tada slijedi da tijelo do kraja prvog intervala prijeđe ukupni put 1, do kraja drugog intervala ukupni put 4, do kraja trećeg intervala ukupni put 9 itd.: prijeđeni put je proporcionalan kvadratu proteklog vremena. Po svemu sudeći Galilei, nažalost, nije poznao te rezultate i nigdje u svojim objavljenim radovima ne spominje ni Mertonovce ni Nikolu iz Orezma. Da je znao za njih odmah bi uočio da rezultati koje je dobio mjerenjima gibanja kuglice niz kosinu odgovaraju gibanju pri kojem je brzina razmjerna proteklom vremenu, a ne prijeđenom putu. Umjesto toga, u dokazu koji nudi u spomenutom pismu Sarpiju polazi od krive pretpostavke da je brzina u ovom slučaju razmjerna prijeđenom putu. Uz to ima velikih problema s pojmom brzine pri ubrzanom gibanju. Premda mu je jasno da se brzina stalno mijenja pokušava naći neku brzinu koja bi karakterizirala gibanje, što je posve razumljivo u toj fazi istraživanja. On još naprosto ne raspolaže adekvatnim pojmovnim aparatom. Konačno, čini neke elementarne računске greške, a konačni produkt svega toga je da naposljetku dolazi do željenoga rezultata.

Tijekom 1607. i 1608. Galilei je sabrao svoje teoreme o gibanju i dodao im nove. Konačno je uvidio da brzina pri slobodnom padu ne ovisi o prijeđenom putu, već o kvadratnom korijenu tog puta. No različite su okolnosti uzrokovale da Galilei nije objavio nikakvu raspravu u gibanju sve do 1638. godine. Te godine je tiskano njegovo djelo *Rasprava o dvije nove znanosti (Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla*

meccanica e i movimenti locali). U tom djelu Galilei raspravu o slobodnom padu počinje riječima da je »eksperimentalno otkrio« neke odlike gibanja »koje vrijedi znati«. Nastavlja da će razmatrati »pojave tijela koja padaju s ubrzanjem kakvo uistinu jest u prirodi i dati definiciju ubrzanog gibanja koja prikazuje njegove bitne odlike«. Dodaje da se to razmatranje »potvrđuje uglavnom time što se eksperimentalni rezultati slažu«. Konačno daje definiciju jednoliko ubrzanog gibanja: »Gibanje je jednoliko ubrzano ako, počinjući od mirovanja, u jednakim vremenskim intervalima stječe jednak porast brzine«. Drugim riječima, za razliku od početnih pokušaja da teorijski izvede mjerenjima dobiven zakon slobodnoga pada – kad je pretpostavio da je brzina pri slobodnom padu razmjerna prijašnjem putu – sada polazi od točne pretpostavke da je brzina razmjerna proteklom vremenu. Što se tiče uzroka slobodnoga pada, tj. odgovora na pitanje *zašto* tijela padaju, Galilei zaključuje: »Čini mi se da nije pravo vrijeme za istraživanje uzroka ubrzanja prirodnoga gibanja, o kojem su razni filozofi davali razna mišljenja. [...] Sve ove fantazije, a i neke druge, valjalo bi razmotriti, ali na to uistinu ne treba trošiti vrijeme. U ovom trenutku cilj je našeg autora samo da ispituje i dokaže neke odlike ubrzanog gibanja (ma što bilo uzrok tog ubrzanja)«.

Budući da je Galilei svoje rezultate dobio pokusima s kosinom potreban mu je most između gibanja po kosini i slobodnoga pada. Taj most uspostavlja postulatom: »Brzine koje jedno te isto tijelo dobije spuštajući se niz različito nagnute kosine su jednake ako su visine tih kosina jednake«. Potom iz gornje definicije jednoliko ubrzanog gibanja izvodi mertonско pravilo srednje brzine, a iz njega ovisnost prijašnjega puta o kvadratu protekloga vremena.

U istom djelu Galilei piše:

Aristotel kaže da kugla teška 100 funti puštena s visine od 100 lakata padne na tlo prije no što je kugla teška 1 funtu prešla 1 lakat. Ja kažem da stižu istodobno. Vi ste, na temelju mjerenja, našli da veća kugla prestiže manju za dva palca. I sada iza ta dva palca želite sakriti Aristotelovih 99 lakata i govoreći o mojoj sićušnoj grešci šutite o njegovoj golemoj.

Kao što smo već rekli (vidi tekst *Aristotel (2. dio)*) ishod tog pokusa nije mogao biti takav.

INERCIJALNO GIBANJE, RELATIVNOST GIBANJA I HORIZONTALNI HITAC

Aristotelova fizika je fizika geocentričnoga svemira. U Kopernikovom svemiru ona posve gubi smisao. No u Galileijevo doba nije postojala nikakva druga fizika primjerena Kopernikovom svemiru, fiziku Kopernikovog svemira je tek trebalo izgraditi, a tek dopunjen odgovarajućom fizikom Kopernikov svemir postaje struktura po sadržaju ekvivalentna aristotelsko-ptolemejskom svemiru. Premda u Kopernikovom svemiru Aristotelova fizika gubi smisao, »argument tornja«, koji je Aristotel rabio kao argument protiv zamisli rotacije Zemlje, ne gubi smisao. Kakva god ispala ta nova fizika Kopernikovog svemira, iz nje mora slijediti da tijelo ispušteno s vrha tornja pada u podnožje tornja, kako svjedoči naše iskustvo. Galilei je toga bio svjestan i vjerojatno ga je taj problem i naveo na razmatranje gibanja. Galilei o gibanjima na pokrenutoj

Zemlji raspravlja u djelu *Dijalog o dva glavna sustava svijeta, ptolemejskom i kopernikanskom (Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano)* iz 1632. godine, gdje kaže: »Glavna stvar je biti u stanju pokrenuti Zemlju bez da se prouzroči tisuću nepravilika«.

Jedna od zamisli pomoću kojih je Galileo pokušao ukloniti te »nepravilike« bila je zamisao tromosti ili inercije, zamisao koja je kasnije ugrađena u temelje Newtonove mehanike. Kao odgovor na pitanje zašto kugla ispuštena s vrha tornja na Zemlji koja rotira oko svoje osi pada u podnožje tornja, Galilei odgovara: »Slijedenje Zemlje je prvobitno i vječno gibanje u kojem ta kugla neiskorjenjivo i neodvojivo sudjeluje kao zemaljsko tijelo, gibanje koje ona posjeduje po svojoj naravi i koje će posjedovati zauvijek«. Budući da nikakav uzrok ne djeluje kao smetnja gibanju kugle od zapada prema istoku, kako se giba površina rotirajuće Zemlje i toranj na njoj, kugla slijedi toranj s vrha kojeg je ispuštena i pada u njegovo podnožje. U *Dijalogu* Galilei razmatra pitanje što bi se dogodilo kad bi se savršena tvrda kugla gibala niz savršeno glatku kosinu. Odgovor je da bi se kotrljala niz kosinu sa sve većom brzinom. Bi li se kotrljala uz kosinu? Ne, osim ako joj se daje neki početni poticaj, a tada bi se pri gibanju stalno usporavala. Što bi se dogodilo kad bi kugla na horizontalnoj podlozi bila gurnuta u nekom smjeru? Tada ne bi bilo nikakvog uzroka za usporavanje ili ubrzavanje i kugla bi se nastavila jednoliko gibati do kraja te podloge. »Tada, ako bi takav prostor bio neograničen, gibanje po njemu bi također bilo neograničeno? To jest neprestano?«. Odgovor je: »Čini mi se da je tako«. Kako je kasnije rekao Descartes, ljudi su postavljali krivo pitanje o gibanju. Pitali su se što održava tijelo u gibanju, a pravo pitanje je što uzrokuje da se ono ikad zaustavi.

Galilei nije rabio riječ »inercija« niti je zapravo rabio ideju inercijalnoga gibanja u smislu u kojem je danas koristimo, tj. u smislu ustrajnosti jednolikog *pravocrtnog* gibanja. Galileijeva inercija je *kružna* inercija. »Horizontalna podloga« koja se spominje u prethodnom odlomku je za Galileija podloga koja je svuda »jednako udaljena od središta Zemlje«. Za Galileija je inercijalno gibanje *jednoliko kružno gibanje*, prirodno gibanje tijela na njegovom prirodnom mjestu u kozmosu, uređenom svemiru. Galilei smatra da je pravocrtno inercijalno gibanje moguće jedino za teška tijela koja prelaze relativno male udaljenosti u blizini površine Zemlje. U njegovoj fizici se brzina teškoga tijela mora smanjivati ili povećavati kako se ono odmiče od središta Zemlje ili mu se približava, tj. kad se uzdiže ili pada. Za kratke horizontalne udaljenosti, kao što je slučaj u njegovom pokusu s horizontalnim hitcem iz 1608., može se smatrati da tijelo ne mijenja udaljenost od središta Zemlje, tako da u takvim slučajevima načelo tromosti u njegovoj fizici odgovara suvremenom. No Galilei nije bio spreman proširiti taj stav u opće načelo. Galileijev svemir nije bezlični svemir mehaničkih zakona i tvari koja se giba. Galileijev svemir je *kozmos*, svemir koji je uredio Bog. Kao takav, svemir je neizbježivo uređen savršenim likom, tj. kružnicom (zato Galilei nikada nije prihvatio Keplerove eliptične putanje planeta). Slijedeći staru tradiciju Galilei je smatrao da je jedino kružno gibanje spojivo s uređenim kozmosom. Tijelo se može neprestano gibati samo po kružnici i jedino u kružnim gibanjima tijela u kozmosu mogu zauvijek zadržati svoje prvobitne odnose. Beskonačno jednoliko gibanje po pravcu podrazumijeva beskonačni svemir, a bilo kakva prirodna sklonost nebeskih tijela k takvom gibanju činila se Galileiju

nespojivom s opaženim poretkom u kozmosu. Ako u prirodi uopće postoji gibanje koje je uistinu jednoliko i stalno, kaže Galilei, tada to mora biti kružno gibanje. Pravocrtno gibanje podrazumijeva nered, tijelo izmješteno iz svog prirodnog mjesta vraća se u njega pravocrtno i kad se nađe u njemu ostaje tu zadobivajući ponovno prirodno kružno gibanje.

Važno je istaknuti da Galileijevo načelo tromosti počiva na novom shvaćanju gibanja. Vidjeli smo da je za Aristotela gibanje *proces* putem kojeg forma tvari od koje je načinjeno tijelo postaje potpunija ili manje potpuna. No Galilei je ukinuo vezu između gibanja tijela i forme tvari od koje je tijelo načinjeno. Gibanje nema utjecaj ni na tijelo ni na tvar od koje je građeno. Gibanje je naprosto *stanje* u kojem se tijelo nalazi i tijelo je indiferentno prema svom stanju gibanja ili mirovanja. Mirovanje se zapravo ne razlikuje od gibanja, ono je tek »beskonačni stupanj sporosti«.

Budući da smo stoga i mi ljudi, kao tijela, indiferentni prema gibanju, moguće je da se gibamo velikom brzinom (primjerice zbog rotacije Zemlje), a da toga nismo svjesni, što je u Aristotelovom svemiru apsurdna tvrdnja. Ono što udžbenici opisuju kao *Galileijevo načelo relativnosti* (zakoni gibanja imaju isti oblik u svim inercijalnim referentnim sustavima, tj. na temelju motrenja mehaničkih pojava unutar inercijalnoga sustava nije moguće reći miruje li sustav ili se giba jednoliko pravocrtno) zapravo ne odgovara posve teoriji koju je on oblikovao da bi pokazao da motritelj na površini Zemlje ne može zapaziti rotacijsko gibanje Zemlje. On općenito tvrdi da gibanje »koje ni na koji način ne fluktuiraju« i koje je zajedničko svim objektima koji čine neki sustav nema učinka na ponašanje tih objekata i stoga se nikako ne može uočiti unutar sustava:

Gibanje, ukoliko jest i djeluje kao gibanje utoliko postoji relativno prema stvarima koje ga ne posjeduju; i među stvarima koje jednako sudjeluju u istom gibanju, ono ne djeluje, i takvo je kao i da ne postoji. Tako roba natovarena na brod napušta Veneciju, prolazi kraj Krfa, kraj Krete, kraj Cipra i stiže u Aleppo [Alep u Siriji]. Venecija, Krf, Kreta itd. mirno stoje i ne gibaju se s brodom; ali što se tiče vreća, kutija i svežnjeva kojima je brod nakrcan i s obzirom na sam brod, gibanje od Venecije do Sirije je kao ništa i ni na koji način ne mijenja njihove međusobne odnose. To je stoga što je ono zajedničko svim tim tijelima i sva jednako sudjeluju u njemu. Da se u tovaru broda neka vreća udalji za palac od neke škrinje, to bi za nju bilo više gibanja nego putovanje od dvije tisuće milja koje su prošle zajedno.

Spomenimo da ovu sliku Galilei nije prvi rabio. Primjerice, još 1377. Nikola iz Orezma u djelu *Rasprava o nebu i svijetu* (vidi tekst *Aristotel (2. dio)*) raspravlja o tome da se na temelju iskustva ne može dokazati da se u jednom danu okrene nebo, a ne Zemlja. Prigovor da vidimo da se Sunce, Mjesec i zvijezde gibaju pobija tvrdnjom da uvijek opažamo samo relativna gibanja i da stoga motrenje ne može razriješiti ovaj problem. Taj argument potkrjepljuje primjerom broda, sličnim onom kojeg je rabio Galilei. Na brodu koji se giba sva se gibanja odvijaju kao i na brodu koji miruje.

Nadalje, budući da je tijelo indiferentno prema gibanju, ono se može istovremeno gibati na različite načine. Jedno od tih gibanja ne utječe na drugo i ona se slažu u neku više ili manje kompleksnu putanju. Zakon slobodnoga pada nije bio jedini zakon gibanja koji je Galilei uspio matematički izraziti. Galilei je 1608. godine izveo pokusa na temelju kojeg je zaključio da tijelo pri horizontalnom hitcu slijedi paraboličnu putanju. U pokusu je mjerio domet kuglice koja se jednoliko giba po horizontalnoj plohi do njena ruba i zatim pada na tlo. Brzinu kuglice je mijenjao tako što ju je puštao da se kotrlja s različitih visina. Zahvaljujući poznavanju Arhimedovih djela dobro je poznao parabolu i ovaj mu je pokus omogućio da motreći putanju kuglice vizualno procjeni da se radi o paraboli.

Galileijevo teorijsko razmatranje horizontalnoga hitca također nalazimo u djelu *Rasprava o dvije nove znanosti* iz 1638. Tu geometrijski dokazuje tvrdnju: »Projektil koji ima jednoliko horizontalno gibanje i njemu dodano prirodno ubrzano gibanje opisuje putanju koja ima oblik poluparabole«. Ovo razmatranje je iznimno važno za povijest fizike. Osim slobodnoga pada sada je još jedno »zemaljsko« gibanje precizno matematički opisano. Štoviše, u tom se zakonu kombinira zakon slobodnoga pada i Galileijevo shvaćanje inercije. Galilei je tu zapravo pokazao mogućnost *slaganja* gibanja, dokazao je da se u ovom slučaju radi o kombinaciji dva nezavisna gibanja koja ne utječu jedno na drugo: horizontalnog jednolikog pravocrtnog gibanja i vertikalnog jednoliko ubrzanog gibanja.

MJERENJE, MATEMATIKA I ASTRONOMIJA

Temelj Galileijeve teorije gibanja bilo je pažljivo mjerenje, kojim je antičku potragu za uzrocima gibanja počeo zamjenjivati traganjem za matematičkim zakonima gibanja. Galilei je uzeo zdravo za gotovo da je mjerenje ključ valjane fizike i ne spominje to izričito u svojim djelima, a korijene takva pristupa valja tražiti u praksama tradicije matematičkoga pristupa prirodnim pojavama, kojoj je pripadao.

Od samog početka je astronomija u cijelosti ovisila o pažljivim mjerenjima. Može se čak reći da astronomija i nije bila drugo do pažljivo mjerenje kutova i vremena te potraga za krivuljama koje sustavno povezuju rezultate takvih mjerenja. Astronomiju su na sveučilištima predavali profesori matematike. Posve druga disciplina, koju su poučavali profesori filozofije, bila je zasnovana na Aristotelovu djelu *O nebu*. Ta disciplina, kozmologija, smatrana je pravom znanošću o nebu, dok filozofi astronomiju u biti nisu smatrali pravom znanošću, već prije umijećem, *techne*. U aristotelskoj kozmologiji mjerenja ne igraju nikakvu ulogu i ona tu prizemnu djelatnost prepušta praktičarima. Takav je stav oblikovan u antičko doba, kad je Hiparh postavio temelje kasnije ptolemejske astronomije u kojoj su bitna jedino mjerenja i računi, a sva objašnjenja su prepuštena filozofima, koji su bili obrazovani za takav pothvat. Drugim riječima, u doba Galileija je u znanosti odavno postojala tradicija mjerenja i računanja, ako astronomiju shvatimo kao znanost, a ne tek kao umijeće, a Galilei je svoju fiziku shvaćao naprosto kao primjenu astronomskih metoda u istraživanju gibanja.

Astronomija je stoljećima ovisila o pažljivim mjerenjima, ali prije Galileija takav postupak nije bio protegnut na razmatranje zemaljskih gibanja.

No motrenja i pokusi su za Galileija postali pouzdani temelj znanosti. Vršio je mjerenja kad god je to bilo moguće te su jedino ona jamčila pouzdanost koju je pripisivao svojim zaključcima. Aristotel je tvrdio da se matematička preciznost ne može očekivati u problemima koji se tiču tvari, a barem do 1602. godine se Galilei slagao s takvim stavom. Kasnije je pak promijenio mišljenje: »To je istina, ali kad je nađemo [matematičku preciznost], zašto je ne iskoristiti?«.

Gledajući unatrag čini se neobičnim da astronomske metode nisu ranije primijenjene na istraživanje zemaljskih gibanja. To se doduše dogodilo u tradicionalnoj mehanici, ali prije 17. stoljeća ta mehanika nije smatrana dijelom fizike i uglavnom je bila ograničena na statiku. No mnogo je teže mjeriti parametre gibanja nego težine i razmake kojima se bavi statika. Osim toga, uzroci gibanja, koji su zapravo jedini zanimali filozofe, ne mogu se razotkriti mjerenjem. Tako se dogodilo da su se srednjovjekovni matematičari gibanjima bavili samo apstraktno, a nisu ni pokušavali mjeriti parametre stvarnih gibanja. Galilei je pak vršio takva mjerenja i ona su ga dovela do otkrića nekih zakona gibanja, ali ih u svojim objavljenim djelima rijetko spominje jer je vjerojatno smatrao da se radi o prirodnoj primjeni postupka koji su davno prije uveli astronomi.

Treba naglasiti i to da mjerenje zahtijeva mjerne jedinice i postoji ograničenje točnosti s kojom se može izvesti neko mjerenje pomoću takvih jedinica i njihovih dijelova. Galilei je za mjerenje prijednog puta tijekom gibanja rabio jedinicu koja iznosi otprilike jedan milimetar, a najmanji dio te jedinice koji bilježi je jedna polovica. To je praktično ograničenje mjerenja udaljenosti pomoću ravnala i golog oka. No praktična granica točnosti uvijek postoji i eksperimentatori prije ili kasnije dođu do nje. Kad je Galilei počeo stvarno mjeriti udaljenosti i vremena, postalo mu je jasno da je stanovito odstupanje od jednostavne matematičke teorije neizbježno. Stoga nije inzistirao na savršenstvu koje su zahtijevali filozofi. Galileijeva se znanost razlikuje od prijašnje filozofije prirode po tome što je zasnovana na *prihvatljivom* slaganju s rezultatima mjerenja, a ne na božanskom umu ili idealima nedostupnim iskustvu, bilo da su oni matematički (kao kod Platona) ili verbalni (kao kod Aristotela).

Galileija je nadasve zanimao odnos matematike i fizike. Njegovi problemi u istraživanju gibanja između 1602. i 1605. bili su semantički i matematički. U to doba ne postoji nikakva općenita definicija »brzine«. Općenito je nisu definirali čak ni srednjovjekovni matematičari koji su je matematički obrađivali. Galilei se pak suočio s kontinuiranom promjenom brzine tijekom slobodnoga pada i da bi se nosio s njom morao je razviti pojam trenutne brzine. Možda bi imao manje semantičkih problema da je poznavao rad Mertonovaca, koji su baratali pojmom trenutne brzine. Primjerice, William Heytesbury (djelovao oko 1335.) je ovako definirao trenutnu brzinu: »trenutna se brzina ne mjeri prijednim putem, već putem koji bi točka prešla u nekom vremenu kad bi se gibala brzinom koju je imala u tom trenutku«. Spomenimo da ni Galilei nije općenito definirao brzinu u suvremenom smislu, kao » $\Delta s / \Delta t$ «, već po grčkoj tradiciji koristi samo »homogene« razlomke, tj. uspoređuje odnose puteva (»put/put«) s odnosima vremena i brzina.

Trebalo je riješiti i jedan matematički problem, budući da »trenutna brzina« vodi do paradoksa beskonačnosti ako se s njome ne barata s velikom

matematičkom vještinom. Galilei je to uspio, ali tek nakon mnogih teškoća i nakon mnogo godina. Ključ Galileijeve matematičke fizike bila je njegova primjena Euklidove teorije razmjera na stvarna mjerenja izvedena s najvećom točnošću koju su omogućavala raspoloživa sredstva. Njezin antički parnjak nije platonička filozofija, koja traga za vječnim istinama onkraj svakog mogućeg mjerenja, već ptolemejska astronomija, koja ovisi o stvarnim mjerenjima.

U djelu *Rasprava o tijelima na ili u vodi (Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua)* iz 1612. Galilei kaže da autoritet Arhimeda ne vrijedi ništa više od autoriteta Aristotela. Arhimed je bio u pravu jedino stoga što se njegove tvrdnje slažu s rezultatima pokusa. Galileijev stav o ulozi matematike u fizici razlikuje se i od Platonovog i od Aristotelovog. Platon je smatrao da je jedino svijet čistih matematičkih ideja vrijedan istraživanja. Ako tjelesni predmeti nisu usklađeni s njime, to gore po njih, budući da su oni ionako manjkavi i nesavršeni. Aristotel je smatrao da su matematički postupci općenito strani fizici, budući da matematičar posve izostavlja tvar iz razmatranja. Oba su ta filozofa bila pod dojmom apstraktne naravi matematike u opreci spram konkretnoga stvarnoga svijeta. Galileija se, s druge strane, dojmila korisnost matematike kao sredstva za istraživanja u fizici. To što se rezultati računa ne poklapaju točno s rezultatima mjerenja nije razlog da jedno ili drugo odbacimo. Slabo poklapanje prije pokazuje da smo nešto izostavili iz razmatranja ili da nešto nismo u stanju uklopiti u razmatranje, a ne da matematiku ili mjerenja treba napustiti. Stare filozofske barijere koje su podigli Platon i Aristotel ustupile su mjesto novom razumijevanju i fizike i matematike.

Tijekom boravka u Padovi Galileji je probio granice tradicionalno postavljene matematičari time što je uspostavio novi odnos između apstraktnih objekata kojima je baratala tradicija matematičkoga pristupa prirodnim pojavama i »stvarnoga svijeta«, zdravorazumskoga tjelesnoga svijeta u kojem se oblikuju naša iskustva. Smatrao je da matematički precizna gibanja koja istražuje imaju veze sa »stvarnim svijetom«, ali ne na način na koji se filozofija prirode bavila tim svijetom. U stvarnom svijetu, koji je Aristotel nastojao shvatiti rabeći svoja neupitno pouzdana temeljna načela, stvarni kamen sasvim sigurno ne pada na tlo jednoliko ubrzano, na što pak upućuje preciznost matematike. Galilei je shvatio da uvođenje matematičke preciznosti u razmatranje gibanja podrazumijeva razlikovanje apstraktne matematičke zbilje i konkretnoga »stvarnog svijeta«, tj. našeg svakidašnjeg »zdravorazumskog« svijeta, strukturiranog tom apstraktnom zbiljom. Mjerenje je pak naš prozor u apstraktnu zbilju, mjerenje apstraktnu matematičku zbilju otvara našem pogledu i možemo ga koristiti da bismo opravdali ili opovrgnuli bilo koji pretpostavljeni opći matematički zakon prirode. Odnos između apstraktne matematičke zbilje koju nam izlaže moderna fizika i naše »zdravorazumske zbilje« je težak za shvaćanje i prihvaćanje, što pokazuju problemi na koje se nailazi u nastavi fizike. U djelu *Il Saggiatore* iz 1623. Galilei kaže da je »knjiga prirode« pisana jezikom matematike, a njena slova su geometrijski likovi te je mogu čitati samo oni koji znaju taj jezik:

Filozofija je zapisana u toj velikoj knjizi – tj. svemiru – koja je stalno otvorena našem pogledu, ali je ne možemo razumjeti prije nego što

shvatimo jezik i naučimo tumačiti slova kojima je napisana. Ona je napisana jezikom matematike i njezina slova su trokuti, kružnice i drugi geometrijski likovi, bez kojih čovjek ne može razumjeti ni jednu jedninu njezinu riječ; bez toga čovjek luta u mračnom labirintu.

U jednom pismu iz 1641. pak kaže da *knjige o prirodi* koje su pisali i rabili filozofi sada valja zamijeniti *knjigom prirode*, tj. eksperimentalnim znanjem. Za Galileija je prava zbilja svijet apstraktnih matematičkih odnosa na kojima se temelji red tjelesnoga svijeta našeg svakidašnjeg iskustva. Kepler bi se djelomično složio s time. No za Keplera, kao i za cijelu astronomsku tradiciju prije njega, samo savršena i vječna nebeska gibanja čine polje za primjenu geometrijske analize. Galilei je pak ustvrdio da je geometrija primjenljiva i na zemaljska gibanja. Da bismo valjano razumjeli tjelesni svijet moramo mu pristupiti s motrišta apstraktne matematičke zbilje. Činjenica da se pojave ne mogu uvijek prevesti u jednostavne matematičke zakone za njega nije argument protiv takvog »matematičkog realizma«, već samo znak da je matematički red prirode često previše složen da bi ga ljudski razum mogao shvatiti. Galilei je dosljedno tvrdio da je tjelesni svijet matematički ustrojen. No smatra da je ta matematička struktura u svojoj cjelini previše složena da bi je naš ograničeni razum u potpunosti shvatio i stoga fizičke pojave u pravilu moramo pojednostavniti da bismo se njima mogli baviti matematički. Stoga za Galileija konkretni tjelesni »stvarni svijet« nije nesavršena realizacija apstraktne matematičke zbilje, nesavršena konkretizacija te idealne matematičke strukture, to nije svijet koji samo donekle, samo »otprilike« slijedi apstraktne matematičke zakone. Za Galileija je razlika između apstraktne matematičke zbilje i konkretnoga tjelesnoga »stvarnog svijet« samo u tome što čovjek nema izravni uvid u apstraktnu matematičku zbilju, već je iskustvo stečeno u konkretnom tjelesnom svijetu jedino sredstvo koje čovjek ima da bi spoznao kakva je uistinu apstraktna matematička zbilja. Neki su aspekti matematičke zbilje u koju tako prodiremo jednostavni i stoga nama spoznatljivi, drugi su pak previše komplicirani da bi nam bili spoznatljivi.

6. Mehanička filozofija

Tijekom prve polovice 17. stoljeća su se tradicija matematičkoga pristupa prirodnim pojavama i tradicija filozofskoga pristupa prirodnim pojavama susrele u nastojanju da se precizno izraze zakoni gibanja. Ta dodirna točka je s jedne strane, iz filozofske tradicije, bila oblikovana napose Descartesovim pristupom gibanju i njegovim zakonima gibanja iz *Pricipia philosophiae*, a s druge strane, iz matematičke tradicije, napose Galileijevim sužavanjem disciplinarnoga procjepa između tradicionalne mehanike i filozofije prirode, prije svega kroz matematiziranje padanja tijela. Koristeći *matematiku* i *mehanička umijeća* da bi došao do eksperimentalno izvedenih zaključaka o gibanju, Galilei je oblikovao moćne metode istraživanja *prirodnoga* svijeta. To je dalo novu dimenziju tradiciji matematičkoga pristupa prirodnim pojavama, kao što su je Descartesovi zakoni gibanja dali filozofskoj tradiciji. Kepler je gibanja planeta sažeo u tri matematički izražena *zakona*; Galilei je pak matematički izrazio *zakon* slobodnoga pada. Time je tradicija

matematičkoga *opisivanja i rekonstruiranja pojava* dosegla novu, višu razinu, razinu matematičkoga *izražavanja zakona* po kojima funkcionira tjelesna zbilja. Produktivna interakcija između ta dva oblika znanja o prirodi nije uslijedila odmah nakon što su tako transformirani, već je bila postignuće druge polovice 17. stoljeća, prije svega ljudi poput Newtona i Huygensa.

Premda se filozofije Descartesa i Gassendija donekle razlikuju, one su očigledno po mnogo čemu slične. Odbacujući Aristotelovu metafiziku prirode, okvir promišljanja prirode utemeljen na pojmovima tvari i forme, bivstva, možnosti i zbiljnosti, četiriju kvaliteta i četiriju uzroka, Descartes i Gassendi oživljavaju i preoblikuju korpuskularnu filozofiju antičkih atomista. To je urodilo korjenitim konceptualnim pomakom, koji je razorio temelje filozofije prirode kakva je prakticirana gotovo dvije tisuće godina. Razmotrimo neke od posljedica takve promjene:

- i) Umjesto svrhovitog, organiziranog i u biti organskog svijeta aristotelske filozofije prirode, nova atomistička metafizika nudi sliku mehaničkoga svijeta neživotne tvari, neprestanoga gibanja i nasumičnih sudara.
- ii) Nova atomistička metafizika rastače osjetne kvalitete, koje u aristotelskoj filozofiji prirode zauzimaju središnje mjesto, i stavlja ih u poziciju drugorazrednih svojstava ili ih čak svodi na privid osjetila.
- iii) Umjesto tvari i forme, kao temeljnih aristotelskih metafizičkih pojmova za objašnjenje prirodnih predmeta i zbivanja, nova metafizika nudi veličinu, oblik i gibanje nevidljivih čestica, uzdižući gibanje na povlašteno mjesto u odnosu na druge vrste promjene.
- iv) Na mjesto aristotelske teleologije koja otkriva svrhu unutar prirode, nova metafizika stavlja svrhe Boga stvoritelja, koje su prirodi nametnute izvana.

Štoviše, nova je metafizika imala dalekosežne posljedice po metodologiju filozofije prirode. Opravdano je reći da su korijeni metodoloških novina 17. stoljeća upravo u novoj metafizici. Očigledno je, primjerice, da je napuštanje aristotelskog pojma naravi, koju se može spoznati jedino istraživanjem stvari u prirodnom stanju, ohrabrilo eksperimentalni pristup prirodnim pojavama. Isto tako nema sumnje da je naglasak na nevidljivim čestičnim mehanizmima iznudio ozbiljno promišljanje naravi hipoteza i njihovog spoznajnoteorijskog statusu. Konačno, pomicanje pozornosti s aristotelskih kvaliteta na geometrijska svojstva čestica, poput oblika, veličine i gibanja, ohrabrilo je primjenu matematike na prirodu.

Ti zajednički elementi Descartesove i Gassendijeve metafizike postali su ishodište *mehaničke filozofije*, sveobuhvatnog programa iz kojeg je izrasla Newtonova mehanika, a s njom i moderna fizika. Ta je metafizika bila onaj sastojak koji je filozofija dala modernoj fizici. To je ujedno slika svijeta koja opravdava eksperimentalno znanje, znanje o *prirodi* stečeno putem *artefakata*, kao i matematiziranje zakona prirode. Filozofska tradicija je dala sliku svijeta koja opravdava primjenu matematike i tehnike u svrhu spoznaje i izražavanja temeljnih zakona prirode. Matematička tradicija je pak novoj fizici u nastajanju dala metodu: precizno mjerenje i matematičko izražavanje zakona prirode.

Čini se da je izraz »mehanička filozofija« prvi rabio Robert Boyle u tekstu *Some Specimens of an Attempt to make Chymical Experiments Usefull to Illustrate the Notions of the Corpuscular Philosophy* uključenom u djelo *Certain*

Physiological Essays i napisanom nešto prije 1661. godine. Boyle tu povezuje Descartesovu filozofiju i filozofiju atomista ili epikurejaca, misleći prije svega na Gassendija, primjećujući da one dijele nastojanje da se prirodne pojave objasne »malim tijelima različitih oblika i različitih gibanja«, te nastavlja:

Obje se škole slažu po tome što se sve prirodne pojave izvode iz tvari i lokalnog gibanja; smatram da se unatoč onim stvarima po kojima se atomisti i kartezijanci razlikuju može reći da se slažu u onom glavnom te pomirljiva osoba može njihove hipoteze smatrati jednom filozofijom. Ta se pak, budući da objašnjava stvari pomoću korpuskula ili malih tijela, može (prikladno) nazvati korpuskularnom; premda je ponekad nazivam feničanskom, budući da neki drevni autori tvrde da je prije Epikura i Demokrita, čak i prije Leukipa, feničanski prirodoslovac [Mochus] nastojao objasniti prirodne pojave pomoću gibanja i drugih utjecaja sićušnih čestica tvari. Koju [tu filozofiju] stoga što su ona [ta gibanja i utjecaji] bjelodana i vrlo moćna u mehaničkim strojevima ponekad također nazivam mehaničkom hipotezom ili filozofijom.

Boyle češće koristi izraz *korpuskularna filozofija* nego *mehanička filozofija*. Tu se ne radi o dvije vrste filozofije prirode, već o dva načina karakteriziranja iste filozofije prirode, pri čemu jedan naglašava sama temeljna konstitutivna tijela, a drugi njihova gibanja. U toj dvojnosti se očituje donekle neodređena narav »mehaničke filozofije« i moguće je upitati se što je Boyle zapravo podrazumijevao pod »mehaničkom filozofijom«. Termin »mehanička filozofija« se, naime, može koristiti da se označe različite teorije:

- i) teorija u kojoj se prirodne pojave objašnjavaju pomoću konfiguracija i gibanja čestica;
- ii) teorija u kojoj je ključni pojam djelovanje putem dodira, tj. djelovanje na način na koji funkcioniraju strojevi;
- iii) teorija koju karakterizira ideja da je svemir i svaki sustav unutar njega stroj ili nalik stroju;
- iv) teorija koju karakterizira ideal matematizirane slike svijeta;
- v) teorija koju karakterizira vjera u nužne zakone gibanja;
- vi) teorija u kojoj je duhovno i nematerijalno isključeno iz područja istraživanja.

Drugim riječima, sam pojam *mehaniziranja* slike svijeta je rastezljiv i ima nekoliko različitih i maglovitih značenja. On može

- i) upućivati na značenje riječi *oruđe* ili *stroj (mašina)* koje podrazumijeva grčka riječ *mechané*, tj. na svjetonazor u kojem je čitav univerzum nalik velikom satu koji je načinio Veliki Urar;
- ii) značiti da se sve prirodne pojave mogu opisati i razumjeti pomoću pojmova i metoda koji pripadaju grani fizike koju danas nazivamo *mehanicom*, a koja u ovom slučaju znači znanost o gibanju.

Tijekom 17. stoljeća mehanika se, kao dio fizike, u velikoj mjeri oslobodila svojih praktičnih korijena, svoje rane povezanosti sa strojevima i s okruženjem obrtnika, inženjera, radionica i mehaničara. S Newtonom se mehanika razvila u granu matematičke fizike. Tzv. »teorija strojeva« je samo jedna od njezinih mnogih praktičnih primjena. No svjetonazor koji su u 17.

stoljeću izražavali i pristaše i protivnici »mehaničke filozofije« uključuje sva gornja značenja. »Mehanička filozofija« (koju ne treba miješati s granom fizike koju danas zovemo *mehanimkom*) bila je zasnovana na sljedećim temeljnim pretpostavkama:

- i) priroda nije živa i oduhovljena, već je sustav tvari koja se giba po nekim zakonima;
- ii) ti zakoni prirode su matematički precizni;
- iii) dovoljan je relativno malen broj tih zakona da bi se objasnio svemir;
- iv) objašnjenje prirodnih pojava isključuje svako pozivanje na svrhe, životne sile ili djelovanje na daljinu.

Stoga svako objašnjenje prirodnih događaja zahtijeva građenje mehaničkog modela kao »zamjene« za pravu pojavu koja se istražuje. Taj model, kao rekonstrukcija događaja, je to valjaniji (tj. bolje odgovara zbilji) što je više kvantitativan. Zbiljske su stvarne čestice i njihova zakonima vođena gibanja. Zbiljski svijet je tapiserija kvantitativnih i mjerljivih podataka, prostora i gibanja i veza u prostoru. Veličina, oblik i stanje gibanja čestica (i za neke događaje neproničnost tvari) su jedina svojstva koja su zbiljska i ujedno načela objašnjavanja zbilje. Bacon, Galileo, Descartes, Pascal, Hobbes, Gassendi, Mersenne, svi razlikuju *objektivna* i *subjektivna* svojstva tijela.

Iz drugog Boyleovog teksta vidimo kako korpuskularni svijet za njega postaje »mehanički«. U djelu *The Origin of Forms and Qualities according to the Corpuscular Philosophy* iz 1666. godine Boyle objašnjava da gotovo sve kvalitete koje su skolastičari opteretili neshvatljivim »formama« mogu nastati »mehanički«, a to za njega znači da mogu biti stvorene

takvim tjelesnim uzročnicima, koji se niti pojavljuju niti djeluju drukčije do putem gibanja, veličine, oblika i slaganja njihovih vlastitih dijelova (koje attribute nazivam mehaničkim svojstvima tvari, budući da njima pripisujemo različita djelovanja mehaničkih strojeva).

Boyle takvu filozofiju prirode naziva »mehaničkom« stoga što je ona instrument objašnjavanja oblikovan po uzoru na tjelesna stanja stvari koja su mehanička u manualnom ili tehničkom smislu. Snaga mehaničkih objašnjenja je u malobrojnosti temeljnih načela i raznolikosti korpuskularnih struktura na kojima počiva, a gibanja kojih su podčinjena prirodnim zakonima koje je zadao Bog. Valja uočiti da se tu ne radi samo o čestičnoj predodžbi sastava tvari, već o korpuskularnoj predodžbi dopunjenoj zakonima gibanja tih čestica.

Boyle je svjestan da su drugi prije njega objašnjavali prirodne pojave u osnovi na isti način. Napose smo istaknuli Gassendija i Descartesa. Često navođen primjer je i Galilejevo objašnjenje dodira, okusa, mirisa, zvuka i topline u djelu *Il Saggiatore* iz 1623. godine, gdje Galilei kaže: »Vjerujem da u vanjskim tijelima nije potrebno ništa osim oblika, brojeva i sporih ili brzih gibanja da bi se u nama pobudili okusi, mirisi i zvukovi. Mislim da kad bi se uši, jezici i nosovi uklonili, oblici i brojevi i gibanja bi ostali, ali ne bi bilo ni mirisa ni okusa ni zvukova. Odvojeni od živih bića ti osjeti nisu ništa više od imena, kao što u odsutnosti pazuha šakljanje nije ništa više od imena«. Često se taj odlomak tumači kao »mehanička filozofija« na djelu početkom 17. stoljeća. No čini se da nitko prije Boylea nije osjećao potrebu da se takav

pristup imenuje, da mu se dade novo ime. Glavna ideja iza tog novog imena je da su veličine, oblici i matematički preciznima prirodnim zakonima upravljana nesvrhovita gibanja čestica tvari temelj objašnjenja svih prirodnih pojava, tj. objašnjenja funkcioniranja svjetskog stroja, kao što se objašnjenje djelovanja strojeva koje je načinio čovjek temelji na veličinama, oblicima i gibanjima dijelova tih strojeva. Stoga Descartesa, primjerice, možemo svrstati u okvir »mehaničke filozofije« ne samo po karakteru njegove filozofije, već i po njegovom vlastitom izjašnjavanju u pismu Froidmontu iz 1637. (vidi tekst *Reenesansa*), u kojem Descartes piše da njegova filozofija »uzima u obzir [samo] oblike, veličine i gibanja, kao što je slučaj u mehanici«. Složeni odnos između mehanike i filozofije prirode u Descartesovoj misli proizlazi uglavnom iz toga što je on zadržao tradicionalni pojam mehanike u smislu statike, stvarajući novu fiziku u kojoj bi takva mehanika trebala naći prirodno mjesto.

Iz navedenih temeljnih pretpostavki mehaničke filozofije vidimo da su se u mehaničkoj filozofiji djelomično pomiješale filozofska i matematička tradicija istraživanja prirodnih pojava. Mehanička je filozofija bila sazdana i od elemenata filozofske tradicije i od elemenata matematičke tradicije. Filozofska tradicija je ponudila i razradila sliku svijeta kao divovskog složenog stroja. Od Arhimeda je pak u okviru matematičke tradicije bila poznata disciplina »mehanika«, u smislu statike, tj. u smislu istraživanja i matematičkoga prikazivanja načela funkcioniranja strojeva. Ako se jednostavni strojevi ponašaju po preciznim zakonima koji se mogu izraziti matematički, a svijet nije drugo nego složeni stroj, tada je opravdano pretpostaviti da i svjetski stroj funkcionira na temelju preciznih zakona koji se mogu izraziti matematički. Termin »mehanika«, u smislu matematičkoga istraživanja strojeva, se proteže na svjetski stroj. Čitav svijet je stroj pa onda i znanost o funkcioniranju strojeva – koja je bila matematička – postaje znanost o funkcioniranju svijeta.

Tako u drugoj polovici 17. stoljeća neki engleski autori počinju rabiti riječ »mehanika« da bi označili matematiziranu opću teoriju gibanja. Primjerice, na početku djela *Usefulness of Mechanical Disciplines to Natural Philosophy* (1671.) Robert Boyle objašnjava čitatelju da:

naziv *mehanika* ovdje ne uzimam u strožem i užem smislu, gdje se koristi samo da označi nauk o pokretnim moćima (poput poluge, vage, vijka ili klina) i o oblikovanju naprava za umnožavanje sile; već ovdje razumijem riječ *mehanika* u širem smislu, za one discipline koje se sastoje u primjeni čiste matematike za stvaranje ili promjenu gibanja tijela: tako da u tom smislu one ne obuhvaćaju samo običnu statiku, već i raznolike druge discipline poput centrobarike [teorija središta teže tijela], hidraulike, pneumatike, hidrostatičke, balistike itd.

Boyle je tu posve u skladu s novom predodžbom prirode i opsega mehanike koja nastaje u Engleskoj 17. stoljeća, a koju u punom obliku dugujemo Johnu Wallisu (1616. – 1703.) i Isaacu Barrowu (1630. – 1677.). Stoga Barrow u djelu *Lectiones mathematicae* (1664. – 1666.) može tvrditi da postoji onoliko mnogo *scientiae mediae* (miješanih matematičkih znanosti) koliko je grana fizike ili filozofije prirode te da nema grane »koja ne podrazumijeva kvantitetu ili na

koju se ne bi mogli primijeniti geometrijski teoremi te koja posljedično nije na neki način ovisna o geometriji, uključujući i zoologiju«. John Wallis pak definira mehaniku kao »geometriju gibanja«, tj. »dio geometrije koji se bavi gibanjem te istražuje, strogo dokazujući i koristeći geometrijsko zaključivanje, sile zbog kojih se takvo i takvo gibanje zbiva«. U skalu s time Wallisova rasprava o gibanjima (i mirovanju) općenito, uključujući ubrzana i usporena gibanja, slobodni pad, gibanje projektila, ravnotežu, središte teže, titranje uzrokovano udarcem, elastičnost i hidrostatičku, iz 1670. godine nosi naslov *Mechanica: sive, de motu, tractatus geometricus*.

7. Isaac Newton i »klasična« mehanika

Vidjeli smo da su ljudi koji su pripremili tlo za mehaničku filozofiju još uvijek pripadali dvjema različitim tradicijama istraživanja prirode, filozofskoj i matematičkoj, ali su se u mehaničkoj filozofiji neki doprinosi tih dviju tradicija skladno sjedinili. Njihovo je djelovanje dovelo do toga da se za Isaaca Newtona (1643. – 1727.) više ne može reći da pripada filozofskoj ili matematičkoj tradiciji: on je naprosto pripadao tradiciji mehaničke filozofije. Njegovo je istraživanje prirode krenulo iz te filozofije, ali ju je i korjenito promijenilo i preobrazilo u modernu fiziku.

DJELOVANJE NA DALJINU

Još tijekom studija Newton se upoznao s djelima Descartesa, Gassendija i Boylea. Na temelju tih djela je prihvatio mehaničku filozofiju, napose Gassendijevu atomističku verziju mehaničke filozofije. Do 1675. godine je na tim temeljima već razradio vlastitu filozofiju prirode, koju je te godine izložio u tekstu *An Hypothesis Explaining the Properties of Light*. U tekstu ukratko izlaže svoju mehaničku sliku prirode. Temeljna pretpostavka je da fluid promjenljive gustoće, a sastavljen od sitnih čestica – *eter* – prožima čitav prostor. Smatra da su sva tijela načinjena od kondenziranog etera te da kondenziranje etera objašnjava gravitacijske učinke: kondenziranje etera u Zemlji podrazumijeva stalno gibanje etera prema Zemlji, što velika tijela povlači prema dolje i čini da se doimaju teškima, a kondenziranje etera u Suncu kroz isti mehanizam održava planete u orbitama.

U toj hipotezi se očituju sve standardne odlike mehaničke filozofije. No posebnost Newtonovog pristupa je naglašavanje nekih specifičnih pojava, koje su zaokupljale njegovu pozornost od studentskih dana, a koje je vrlo teško objasniti standardnim sredstvima mehaničke filozofije, tj. oblicima, veličinama i gibanjima čestica. Jedna od tih pojava je kohezija tijela, koja se u atomističkoj filozofiji objašnjavala slaganjem atoma odgovarajućih oblika, a u Descartesovoj naprosto relativnim mirovanjem dijelova tijela. Newton nije bio zadovoljan ni jednim od tih rješenja. Pitao se nadalje zašto se u nekim kemijskim reakcijama razvija toplina. On toplinu shvaća na način kako je ona tumačena u okviru mehaničke filozofije, kao osjet koji izaziva gibanje čestica od kojih je tijelo sastavljeno i pitao se što uzrokuje to gibanje kad se dvije tvari nježno pomiješaju. U okviru čisto mehaničke slike svijeta nije bilo lako ni odgovoriti na jednostavno pitanje zašto se voda miješa s vinom, a ne miješa s

uljem. Newton u tom kontekstu spominje »neko tajno načelo prirode po kojem se tekućine združuju s nekim stvarima, a ne združuju s drugima«. No govoriti o »tajnom načelu« združivosti zaziva duhove okultnih kvaliteta, upravo ono što je mehanička filozofija nastojala istjerati iz slike svijeta. Newton je zamislio svoju hipotezu o eteru kao osnovu za mikroskopske mehanizme koji bi mogli objasniti takve pojave, no očigledno nije bio zadovoljan s mehaničkim objašnjenjima takvih pojava i do 1686. su u njegovim razmišljanjima sile »na daljinu« između čestica zamijenile taj eter. Dvadeset godina kasnije, u prvom latinskom izdanju djela *Opticks* iz 1706. Newton je tim razmišljanjima dao konačni oblik:

Nemaju li male čestice tijela neke moći, svojstva ili sile putem kojih djeluju na daljinu, ne samo na zrake svjetlosti, odbijajući ih i lomeći, već i jedna na drugu, stvarajući velik dio prirodnih pojava? Jer, dobro je poznato da tijela djeluju jedno na drugo gravitacijskim, električnim i magnetnim privlačenjem; ...

Newtonovo prihvaćanje sila koje djeluju između čestica tvari je označilo njegov raskid s mehaničkom filozofijom. Ne treba nas stoga čuditi da su Newtonovi kritičari smatrali da se on vraća na stil objašnjenja renesansnoga naturalizma, potkopavajući temelje na kojima počiva znanost. No Newton nije uvođenje sila među česticama smatrao odricanjem od mehaničke filozofije, već korakom nužnim da se ona usavrši. Dodajući tvari i gibanju treću kategoriju – silu – htio je pomiriti matematičku mehaniku i mehaničku filozofiju. Sila za njega nikad nije bila mračno kvalitativno djelovanje, poput simpatija i antipatija renesansnoga naturalizma. On ju je smjestio u precizni mehanički kontekst, u kojem se sila mjeri količinom gibanja koju može proizvesti. Stoga je za Newtona pojam sile bio sredstvo pomoću kojeg se galilejska tradicija mogla uvesti u mehaničku filozofiju.

Mnogi znanstvenici toga doba koji su pristajali uz mehaničku filozofiju, uključujući primjerice Huygensa, nisu s oduševljenjem prihvatili »još jednu teoriju privlačenja«. Što je gravitacijsko privlačenje? Ono ili ima mehanički uzrok, koji bi Newton trebao objasniti, ili je naprosto okultna kvaliteta, što je neprihvatljivo. Ono što je Newtona konačno uvjerilo da uvede novu kategoriju – međudjelovanje na daljinu – u metafiziku mehaničkoga svemira vjerojatno ima veze s njegovim shvaćanjem znanosti. U okviru mehaničke filozofije se općenito smatralo da je svemir posve pristupačan čovjekovom razumu. U tom kontekstu se činilo da zakon opće gravitacije postavlja neprozirni zastor na jednoj razini razumijevanja. Glavna razlika između Newtona i tradicionalnih pristaša mehaničke filozofije bila je u tome što je on u svojoj znanosti bio spreman prihvatiti konačnu neshvatljivost prirode. Newton je na prigovore stalno odgovarao da je pomoću gravitacije objasnio pojave, ali da nije u stanju objasniti uzrok gravitacije. Za Newtona je sila bila pojam nužan za mehaničko objašnjenje pojava. Vrijednost tog pojma nije počivala na hipotezi koja bi objasnila izvor sile, već na korisnosti u matematičkim izvodima. Newton je vjerovao da je priroda naposljetku neprozirna za ljudski razum. Znanost nam ne može dati pouzdano znanje o biti stvari. No upravo to je bio program mehaničke filozofije i stalni poriv da se zamišljaju nevidljivi mehanizmi je proizlazio iz uvjerenja da je znanstveno objašnjenje valjano samo onda kad

slijedi pojavu do krajnjih izvora. Za Newtona je pak moguće da neke aspekte prirode nikada nećemo shvatiti. Newton je vjerovao da je cilj fizike egzaktno kvantitativan opis gibanja. Stoga je za njega pojam sile bio prihvatljiv u znanstvenim raspravama čak i ako ne znamo što sila uistinu jest, što je njezin uzrok i prava narav.

ZAKON GRAVITACIJE

Newton se gibanjima počeo baviti još u studentskim danima i u njegovim bilježnicama iz 1664. godine se mogu naći opaske o načelu inercije, bjelodano nadahnute Descartesovim djelom. Te su opaske bile uključene u njegovo razmatranje sudara tijela, jedinoga načina međudjelovanja prihvaćenog u mehaničkoj filozofiji. Kroz to razmatranje je došao do istog zaključka kao i Huygens nekoliko godina ranije – središte težine dvaju izoliranih tijela koja se sudare nastavlja mirovati ili se gibati jednoliko pravocrtno. Nešto kasnije ide korak dalje dodajući tijelima koja se sudaraju rotaciju te dolazi do zakona očuvanja kutne količine gibanja. Tako je pod naslovom »Zakoni gibanja« izveo opći izraz za sudar bilo koja dva tijela s translacijskim i rotacijskim gibanjem. Naslov tog teksta ponovno izražava kontekst u kojem je taj izraz izveden: za Newtona su u to vrijeme »zakoni gibanja« naprosto zakoni sudara.

No Newton je u isto vrijeme razmišljao i o gibanjima tijela različitih veličina:

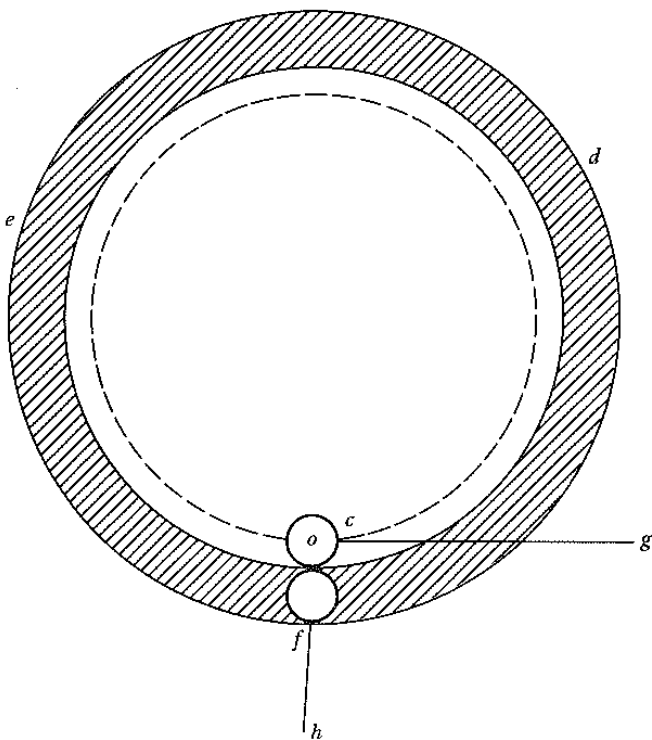
Tako se pokazuje kako i zašto među pokrenutim tijelima neka zahtijevaju jači ili efikasniji uzrok, a druga slabiji, da se smanji ili poveća njihova brzina. Moć tog uzroka se obično naziva sila. I budući da taj uzrok koristi ili primjenjuje svoju moć ili silu da spriječi ili promijeni ustrajnost tijela u njihovom stanju, kaže se da ono nastoji promijeniti njihovu ustrajnost.

Što je sila? U kontekstu prevladavajuće mehaničke filozofije ona može značiti samo jedno: »Sila je pritisak jednog tijela na drugo ili guranje jednog tijela drugim«. S tim bi se složili i Descartes i Gassendi i Boyle. No Newton se pitao nešto što se oni nisu pitali. Descartes, koji je česticu u gibanju smatrao uzročnim čimbenikom, je govorio o »sili gibanja tijela«. Newton, s druge strane, o sili razmišlja kao o apstraktnoj veličini koja može mjeriti promjenu gibanja pokrenutog tijela. No u to je doba još uvijek sudar jedini izvor sile koji je Newton spreman prihvatiti, tako da se »sila« koju on rabi ne razlikuje od Descartesove »sile pokrenutog tijela«:

Ako se dva tijela, p i r , sretnu, otpor u oba je isti jer koliko p pritiska na r toliko r pritiska na p . I stoga oba moraju pretrpjeti istu promjenu gibanja.

Prethodnik te tvrdnje je Descartesova tvrdnja da jedno tijelo u sudaru može steći samo onoliko gibanja koliko drugo izgubi, no Newtonov je iskaz čvrsto ugrađen u kontekst matematičke teorije gibanja, po uzoru na Galileija.

U jednom ranom tekstu Newton se pozabavio problemom kružnog gibanja. Zahvaljujući Descartesovom uvidu usvojio je temeljnu odliku kružnog gibanja: da bi tijelo slijedilo kružnu putanju mora se stalno otklanjati od prirodne pravocrtne putanje. Očigledno proširivanje stava prihvaćenog u slučaju sudara moglo je Newtona navesti na istraživanje sile koja takvo tijelo otklanja od pravocrtne putanje. No on nije krenuo tim putem, već je, kao i drugi koji su u to vrijeme istraživali kružno gibanje, pozornost usredotočio na težnju *od* središta gibanja koju očituje tijelo u kružnom gibanju, tj. na centrifugalnu silu. Poput Huygensa, pokušao je naći kvantitativnu mjeru te težnje, što je težak problem ako se sila shvaća kao mjera ukupne promjene gibanja pri sudaru. Da bi takvo shvaćanje sile primijenio na kružno gibanje Newton je zamislio da se tijelo koje se otklanja u kružnu putanju sudara s beskonačno mnogo jednakih tijela, dok se ukupno gibanje preneseno tim tijelima koncentrira u jednom od njih:



Valjkasto tijelo *def* prisiljava tijelo *o* da se giba po kružnoj putanji. Kad se tijelo *o* nalazi u točki *c* ono se nastoji gibati pravocrtno duž crte *cg* i pritiska valjak. Zamislimo da je valjak *def* načinjen od mnoštva razdvojenih tijela poput onog u točki *f*. Gibajući se po kružnici tijelo *o* pritišće svako od tih tijela prenoseći im gibanje. Newton je zamislio da je cjelokupno preneseno gibanje preneseno na tijelo u točki *f* te da je gibanje tog tijela duž crte *fh* mjera ukupne sile udaljavanja tijela *o* od središta kružnog gibanja.

Tako je Newton došao do zamisli ukupne sile koju tijelo primjenjuje tijekom jednog ophoda, a koja je jednaka ukupnom gibanju proizvedenom u drugom tijelu. Geometrijskom analizom je dokazao da je odnos između ukupne sile u jednoj revoluciji i sile gibanja tijela (tj. količine gibanja tijela *mv*

u modernoj terminologiji) jednak odnosu opsega i radijusa kružne putanje. Podijelimo li tu ukupnu silu s vremenom potrebnim za jedan ophod:

$$\frac{2\pi r}{v}$$

Newtonov odgovor se svodi na suvremeni izraz za centrifugalnu silu:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

U drugom tekstu, vjerojatno iz 1666. godine, Newton je tako dobiven rezultat iskoristio da bi usporedio centrifugalnu tendenciju Mjeseca s gravitacijskim ubrzanjem na površini Zemlje te da bi međusobno usporedio centrifugalne tendencije planeta. Drugi se problem uz pretpostavku savršeno kružnih putanja planeta svodi na kombiniranje njegove formule s Keplerovim trećim zakonom. Tako je dobio da centrifugalna tendencija planeta opada razmjerno kvadratu radijusa orbite. U slučaju Mjeseca je pak dobio da odnos približno odgovara odnosu kvadrata radijusa Zemlje i kvadrata radijusa putanje Mjeseca oko Zemlje. Tako taj tekst sadrži temeljne kvantitativne odnose na kojima počiva zakon opće gravitacije, premda se u njemu uopće ne govori o privlačenju – Newton tu ne govori o gravitacijskom privlačenju, već o tendenciji tijela *od* središta kružnog gibanja.

Tijekom sljedećih desetak godina Newton se uglavnom bavio optikom, matematikom, teologijom i alkemijom. No 1679. godine se putem pisama upustio u raspravu s Robertom Hookeom (1635. – 1703.), tijekom koje je Hooke, odgovarajući na jednu Newtonovu primjedbu, ustvrdio, bez matematičkoga dokaza, da bi u jednom posebnom slučaju gibanja tijela na koje djeluje privlačenje koje opada razmjerno kvadratu udaljenosti tijela od središta privlačenja putanja tog tijela bila zatvorena i nalik elipsi (»elipsoid«, kaže Hooke). Newton je kasnije priznao da ga je Hookeovo pismo potaknulo da pokaže da ako se tijelo giba po eliptičnoj putanji oko središta privlačenja smještenog u jednom od žarišta, privlačna sila mora biti inverzno proporcionalna kvadratu udaljenosti tijela od žarišta. Tako je 1680. Newton dokazao jednu od dvije temeljne propozicije na kojima počiva zakon opće gravitacije.

Treba uočiti da 1666. godine Newton još nije razmišljao o središnjem privlačenju, već o centrifugalnoj tendenciji. No Hookeova opaska o središnjem privlačenju je došla upravo u trenutku kad su Newtona vlastita razmišljanja dovela do toga da ustvrdi postojanje djelovanja na daljinu između čestica. S druge strane, ideja privlačenja je dala fizički sadržaj matematičkoj apstrakciji sile, kojoj su se približavala Newtonova raniji istraživanja u mehanici.

U ljeto 1684. je Newtona u Cambridgeu posjetio astronom Edmond Halley (1656. – 1742.) koji se bez uspjeha mučio s problemom orbitalnog gibanja. Ni on ni Hooke ni drugi nisu uspjeli matematički izvesti Keplerove eliptične putanje iz Hookeove pretpostavke da na planete djeluje privlačenje inverzno proporcionalno kvadratu udaljenosti. Halley je upitao Newtona kakvu bi putanju slijedilo tijelo koje se giba oko drugog tijela, a koje ga privlači silom inverzno proporcionalnom kvadratu udaljenosti. Newton je imao

spreman odgovor: to je elipsa! Konačni rezultat tog posjeta je bilo Newtonovo djelo *Philosophiae naturalis principia mathematica* objavljeno 1687. godine, u kojem izlaže temelje klasične mehanike. Naime, Newton 1684. nije mogao Halleyu pokazati dokaz svoje tvrdnje jer je u međuvremenu izgubio papire na kojima ga je izveo. Stoga je obećao da će mu naknadno poslati dokaz. Tako je Halley ujesen te godine od Newtona primio kratku raspravu o gibanju koja sadrži temeljne ideje Newtonove mehanike i izložio je pred Kraljevskim društvom u Londonu.

PHILOSOPHIAE NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA

Sam naslov ovog djela izražava Newtonov stav prema fizici: načela filozofije prirode su matematička. Za razliku od Descartesa Newton je koristio matematiku da bi izrazio načela filozofije prirode, dok je istodobno usvojio kulturu eksperimentiranja te nije prihvaćao hipoteze koje nisu zasnovane na iskustvu. Premda je dvadesetak godina ranije razvio infinitezimalni račun, djelo je izložio, uz neke iznimke, u klasičnom jeziku geometrije.

Djelo počinje *Definicijama*:

- i) Definira količinu tvari ili *masu* kao umnožak volumena i gustoće i jasno razlučuje masu tijela (koja ostaje ista svuda u svemiru) i težinu tijela (koja ovisi o gravitacijskoj sili).
- ii) Definira *količinu gibanja* kao umnožak mase i brzine tijela.
- iii) Definira *unutrašnju silu* tvari zbog koje svako tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog pravocrtnog gibanja te je stoga, kaže, možemo zvati »inercijom«.
- iv) Definira *utisnutu silu* kao djelovanje na tijelo koje mijenja njegovo stanje mirovanja ili jednolikog pravocrtnog gibanja.
- v) Definira *centripetalnu silu*, silu koja »traži središte«.

Potom slijedi *Scholium*, rasprava o »pozornici« na kojoj se odvijaju gibanja, tj. o prostoru i vremenu. Newton zaključuje da je prostor *apsolutan* – po opstojnosti i ustroju neovisan o vremenu, tvar i međudjelovanjima – a isto vrijedi za vrijeme. Tako apsolutni prostor i apsolutno vrijeme uspostavljaju apsolutni referentni sustav, u odnosu na koji se određuje apsolutno stanje mirovanja ili gibanja. Newton je, naravno, svjestan da je takav apsolutni referentni sustav čovjeku nedostupan te da gibanja možemo razmatrati jedino u okviru odabranoga *inercijalnoga referentnog sustava*, tj. referentnog sustava koji miruje ili se jednoliko pravocrtно giba u odnosu na apsolutni prostor. Valja spomenuti da su za Newtona prostor i vrijeme *objektivni*, tj. nisu, kao kasnije za Kanta, *čisti zorovi*, apriorne forme koje organiziraju naše osjetilne zamjedbe.

U *Prvoj knjizi* Newton potom daje tri zakona gibanja.

Prvi zakon izražava načelo inercije koje izravno slijedi iz Galileijevih i Descartesovih razmatranja: »Svako tijelo ostaje u svom stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po ravnoj crti, sve dok silama koje djeluju na njega nije prisiljeno promijeniti to stanje«.

Drugi zakon povezuje silu (uzrok gibanja) i učinak (promjenu gibanja): »Promjena gibanja je proporcionalna utisnutoj pokretačkoj sili i do nje dolazi u smjeru u kojem djeluje ta sila«. Uočimo da se u Newtonovom izrazu drugoga zakona zrcale njegova ranija razmatranja sudara.

Treći zakon, načelo akcije i reakcije, je Newton prvi formulirao, no ono se može shvatiti kao protezanje Huygensovih zakona sudara na dinamiku: »Za svako djelovanje uvijek postoji jednako i suprotno protudjelovanje, ili, uzajamna djelovanja dvaju tijela jedno na drugo su uvijek jednaka i suprotno usmjerena«.

Valja spomenuti da neki autori udžbenika fizike smatraju da je Prvi zakon nepotreban, da je to višak u strukturi teorije, dok ga neki drugi smatraju naprosto definicijom inercijalnoga referentnog sustava. Vidimo da su takvi stavovi teško održivi. S jedne strane, inercijalni referentni sustav je naprosto referentni sustav u kojem vrijede Newtonovi zakoni gibanja, ni jedan od njih nije naprosto definicija takvog referentnog sustava. S druge strane, Prvi zakon je bjelodano neizostavan u strukturi teorije. Valja uočiti da Newton isprva zakone gibanja izražava *verbalno*: Prvi zakon kaže što se s tijelom događa kad na njega ne djeluje sila, a Drugi zakon kaže što se s tijelom događa kad na njega djeluje sila. Tek kasnije u tekstu Newton kombinira *oba ova zakona* u matematički izraz koji danas pišemo u obliku

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

No poistovjećivanje ovog izraza s Drugim zakonom stvara dojam da iz njega slijedi Prvi zakon (za $F = 0$).

U *Prvoj knjizi* Newton potom primjenjuje zakone gibanja na točkaste mase koje se gibaju bez otpora, napose na točkaste mase koje se gibaju oko središta privlačenja. Iz svojih zakona gibanja izvodi neke korolare, primjerice, korolar o slaganju sila: »Tijelo na koje istodobno djeluju dvije sile će opisivati dijagonalu paralelograma u istom vremenu u kojem će zbog tih sila odvojeno opisivati stranice«. Također izvodi Keplerove zakone gibanja planeta uz pretpostavku centripetalne sile inverzno proporcionalne kvadratu udaljenosti i pokazuje da će putanje tijela u tom slučaju biti čunjosječnice – elipse, parabole ili hiperbole – ovisno o tangencijalnoj brzini tijela. Dokazao je da Keplerov drugi zakon zahtijeva središnju silu između Sunca i planeta: sila koja otklanja planet od prirodnog pravocrtnog gibanja i održava ga u orbiti u svakom trenutku mora biti usmjerena prema Suncu. Također je dokazao da Keplerov prvi zakon može vrijediti jedino ako je ta središnja sila inverzno proporcionalnu udaljenosti planeta od Sunca. Konačno, dokazao je da iz kombiniranja njegovog Drugog zakona i trećeg Keplerovog zakona slijedi da je središte sile koja djeluje na planete u Suncu te da je ta sila inverzno proporcionalnu udaljenosti od Sunca.

U *Drugoj knjizi* Newton razmatra gibanje tijela u fluidu koji pruža otpor gibanju tijela i gibanje samih takvih fluida, što je u biti početak razvoja dinamike fluida. Tu također razara Descartesovu teoriju vrtloga, pokazujući da se gibanje vrtloga ne može samo održavati. Zaključuje da iz teorije vrtloga ne može uslijediti planetni sustav koji slijedi Keplerove zakone: »teorija vrtloga je posve protivna astronomskim pojavama i nebeske pojave prije čini nerazumljivima nego što ih objašnjava«.

Treća knjiga, nazvana *Sustav svijeta*, prikazuje »ustroj sustava svijeta«. Newton tu dokazuje da Keplerovi zakoni vrijede za putanje satelita oko Jupitera, za putanju Mjeseca oko Zemlje te za putanje Zemlje i ostalih planeta

oko Sunca. U Trećoj knjizi Newton se nadalje pita što bi mogla biti ta središnja sila inverzno proporcionalna udaljenosti iz koje slijede Keplerovi zakoni. Razmatrajući centripetalno ubrzanje Mjeseca zaključuje da je gravitacija Zemlje dovoljna da održi Mjesec u orbiti. To znači da je ta centralna sila inverzno proporcionalna udaljenosti upravo i jedino gravitacija. Konačni zaključak je njegov *opći zakon gravitacije* koji danas pišemo u obliku

$$F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Newton je tako pokazao da jedan jedini zakon objašnjava i padanje jabuke sa stabla i gibanje planeta oko Sunca i plimu. Mnogi smatraju da je račun u *Trećoj knjizi* kojim je pokazao da Mjesec u orbiti oko Zemlje drži ista ona sila zbog koje tijela na Zemlji padaju na tlo jedno od najvećih postignuća ovog djela. Rezultat je bilo konačno sjedinjenje zemaljske i nebeske fizike.

U nastavku *Treće knjige* Newton je dokazao da zakon gravitacije u gornjem obliku ne vrijedi samo za točkaste mase, već i za homogene kugle, objasnio je razne pojave u svezi s njihalom, izračunao je masu Zemlje i pokazao da je precesija ekvinocija posljedica oblika Zemlje i nagnutosti njezine osi, objasnio je plimu i oseku kao posljedicu združenog djelovanja privlačenja Sunca i Mjeseca te je dokazao da za gibanje kometa vrijede isti oni dinamički zakoni koji upravljaju Sunčevim sustavom.