

Neįtikėtinas matematikos gamtos moksluose efektyvumas

Eugene Wigner

E. Wigner (1902–1995) — amerikiečių fizikas. Gimė Vengrijoje, studijavo Berlyne. Nuo 1930 metų profesoriavo Prinstono universitete (JAV). Antrojo pasaulinio karo metu dalyvavo vadinamajame Manheteno projekte kuriant atominę bombą. Už atomo branduolio struktūros tyrimus kartu su kolegomis 1963 metais gavo Nobelio premiją. Šiame straipsnyje, kuris pirmą kartą buvo išspausdintas žurnale „Communications in Pure and Applied Mathematics“ (vol. 13, N. 1, 1960) autorius svarsto, kodėl matematikos vaidmuo fizikoje toks didelis. Pagrindinė išvada, kad matematika taip gerai tinka gamtos dėsniams formuluoti, yra stebuklas!

Tinkamai pažvelgę į matematiką pamatysime ne tik tiesą, bet ir aukščiausią grožį — šaltą ir griežtą tarsi skulptūros grožį, nesikreipiantį į silpnąsias mūsų prigimties puses, neturintį tapybos ar muzikos puošnumo, gryną ir griežtai tobulą grožį, kokį gali atskleisti tik didysis menas. Matematika lygiai taip pat kaip ir poezija gali sukelti pasigėrėjimą, egzaltaciją, jausmą, kad pakylama virš paprastos žmonių būties. Tai būdinga tik patiems tobuliausiems kūriniams.

Bertranas Raselas. Matematikos studijos

Štai viena istorija apie du draugus, buvusius bendraklasius, pasakojančius vienas kitam apie savo darbus. Vienas iš jų tapo statistiku, jis tiria gyventojų skaičiaus kitimą. Draugui jis parodė vieną savo straipsnį, kuris, kaip paprastai, prasidėjo Gauso skirstiniu. Statistikas paaiškino buvusiam bendramoksliui simbolius, reiškinčius realų gyventojų skaičių, vidutinį gyventojų skaičių ir pan. Bendramokslis kiek nepatikliai klausėsi, nes nebuvo tikras, ar statistikas jo nevedžioja už nosies. „Iš kur tu gali tai žinoti?“ — vis klausinėjo jis. „O ką reiškia šis simbolis?“ „Tai π “, — atsakė statistikas. „Kas tai?“ „Apskritimo ilgio ir skersmens santykis“. „Na, tu su savo juokais nuėjai per toli“, — tarė draugas. „Aišku, kad gyventojų skaičius niekaip nėra susijęs su apskritimo ilgiu“.

Suprantama, naivus bendramokslio požiūris mums sukelia šypseną. Šiaip ar taip, kai pirmą kartą išgirdau šią istoriją, pasijutau nejaukiai, nes bendramokslio reakcija parodė, koks yra

įprastas sveiko proto požiūris. Aš dar labiau sumišau, kai praėjus ne tiek jau daug dienų kažkas atėjo pas mane ir išreiškė abejones dėl to, kad mūsų duomenų, kuriais tikriname savo teorijas, pasirinkimas yra gana siauras. Jis svarstė: „Iš kur mes žinome, kad atsižvelgdami į tuos reiškinius, kuriuos dabar ignoruojame ir ignoruodami tai, kam dabar skiriame dėmesio, negalime sukurti teorijos, kuri mažai ką turi bendro su dabartine, tačiau paaiškina tiek pat reiškinių?“

Reikia pripažinti, kad tikrai nėra akivaizdaus įrodymo, jog tokia teorija negalima.

Šios dvi istorijos iliustruoja pagrindinius mūsų svarstymo momentus. Visų pirma matematinės sąvokos pasitaiko visiškai netikėtuose sąryšiuose. Negana to, jos dažnai suteikia galimybę tiksliai aprašyti šių sąryšių reiškinius. Kita vertus, mes nežinome, kodėl jos yra naudingos, taip pat negalime žinoti, ar teorija, suformuluota naudojantis matematinėmis sąvokomis, yra vienintelė tinkama. Mūsų padėtis

panaši į žmogaus, kuris su raktų ryšuliu bandydamas atrakinti kelerias duris rado tinkamą raktą iš pirmo ar antro karto. Jam kyla abejonų, ar kiekvienoms durims tinka tik vienas raktas.

Daug šiuo klausimu minčių, dėsnomų šiame straipsnyje, nėra naujos; tikriausiai viena ar kita forma jos kilo daugeliui mokslininkų. Mano pagrindinis tikslas — pažvelgti į jas iš įvairių pusių. Visų pirma nepaprastas matematikos naudingumas gamtos moksluose yra kone paslaptingas dalykas, jam nėra racionalių paaiškinimų. Kita vertus, kaip tik šis slėpingas matematikos sąvokų naudingumas kelia klausimą apie fizikinių teorijų vienatumą. Norint paaiškinti, kodėl matematika vaidina neįtikėtinai svarbų vaidmenį fizikoje, naudinga trumpai aptarti, kas yra matematika, po to, kas yra fizika, kaip matematika dalyvauja fizikinėse teorijose ir pagaliau kodėl matematikos sėkmė ir jos vaidmuo fizikoje taip stulbina. Mažiau galima pasakyti antruoju klausimu — apie fizikos teorijų vienatumą. Pagrįstas atsakymas pareikalautų išsamių eksperimentinių ir teorinių tyrimų, kurie dar nėra pakankami.

Kas yra matematika?

Kažkas yra pasakęs, kad filosofija tėra piktnaudžiavimas terminologija, sukurta šiam tikslui. Tam tikra prasme galima teigti, kad matematika yra sumanaus operavimo sąvokomis ir taisyklėmis, sukurtais tokiam tikslui, mokslas. Sąvokų sukūrimas čia turi esminės reikšmės. Matematika greitai išsemtų visas įdomias teoremas, jeigu jas reiktų formuluoti pasitelkiant tik tas sąvokas, kurios jau naudojamos aksiomose. Be to, nors neginčytina, kad elementariosios matematikos ir skyrium imant elementariosios geometrijos sąvokos yra suformuluotos siekiant aprašyti realaus pasaulio reiškinius, tai jau nebeatrodo teisinga kalbant apie sudėtingesnes sąvokas, taip pat ir apie sąvokas, labai svarbias fizikoje. Pavyzdžiui, aišku, veiksmų su skaičių poromis taisyklės sudarytos taip, kad rezultatai būtų tie patys kaip ir veiksmų su trupmenomis, kurias mes pirmiausia išmokstame visai nesinaudodami „skaičių poromis“.

Veiksmų su sekomis, t. y. su iracionaliaisiais skaičiais, taisyklės taip pat priklauso kategorijai taisyklių, kurios sudarytos taip, kad atitiktų veiksmus su jau žinomais dydžiais. Tačiau kur kas sudėtingesnės sąvokos, pavyzdžiui, kompleksinių skaičių, algebrų, tiesinių operatorių, Borelio aibių — sąrašą galima tęsti ir tęsti, sukurtos taip, kad matematikai galėtų demonstruoti savo išradingumą ir formalaus grožio jausmą. Iš esmės šių sąvokų apibrėžimais pirmiausia atsiskleidžia jas apibrėžusio matematiko išradingumas, jeigu tik pasirodo, kad šias sąvokas galima įdomiai ir išradingai nagrinėti. Minties darbą, kuris atliekamas formuluojant matematines sąvokas, vėliau pateisina meistriškumas, su kuriuo šios sąvokos yra naudojamos. Didis matematikas visiškai, kone negailestingai, išnaudoja visas leistino protavimo galimybes, balansuodamas ant neleistinumų ribos. Tai, kad jo beatodairiškumas nenuveda į prieštaravimų klampynę, yra stebuklas: iš tiesų sunku patikėti, kad mūsų mąstymą taip iš tobulino Darvino natūralios atrankos procesas. Tačiau tai ne mūsų svarstymų tema. Svarbiausias dalykas, kurį prisiminsime ir vėliau, yra tai, kad matematikas, neapibrėžęs naujų sąvokų, kurių nėra aksiomose, galėtų suformuluoti tik nedaug teoremų. Šios naujos sąvokos apibrėžiamos taip, kad su jomis būtų įmanomos išradingos loginės operacijos, tiek pačios savaime, tiek savo paprastais ir didelio bendrumo rezultatais tenkinančios mūsų estetinį jausmą.

Kompleksiniai skaičiai yra gera to, kas pasakyta, iliustracija. Išties mūsų patirtis niekaip neskatina įvesti šių dydžių. Tačiau jeigu paprašytume matematiko pateisinti savo susidomėjimą kompleksiniais skaičiais, jis, kiek įsižeidęs, iš lygčių teorijos, eilučių bei analizių funkcijų teorijos parodytų mums daugybę gražių teoremų, kurių šaltinis — kompleksiniai skaičiai. Matematikas nenustos domėtis šiais gražiausiais genialaus matematinio proto laimėjimais.

Kas yra fizika?

Fizikai domisi negyvosios gamtos dėsniais. Iš pradžių reikia panagrinėti pačią sąvoką „gamtos dėsnis“.

Pasaulis aplink mus yra stulbinančiai sudėtingas, labiausiai krinta į akis tai, kad mes negalime numatyti ateities. Tačiau anekdotuose požiūrį, kad ateities negalima numatyti, gina tik optimistas. Optimistas iš tikrųjų teisus: ateitis nenuspėjama. Kaip pastebėjo Šredingeris, tai stebuklas, kad nepaisant šio stulbinančio pasaulio sudėtingumo gali būti atskleisti tam tikri įvykių dėsningumai. Viena iš tokių dėsnių nustatė Galilėjus: du akmenys, paleisti kristi vienu metu iš to paties aukščio, pasiekia žemę vienu metu. Gamtos dėsniai susiję su tokiais dėsningumais. Galilėjaus dėsnis yra daugelio dėsnių prototipas. Šis dėsningumas kelia nuostabą dėl trijų priežasčių.

Pirmoji priežastis — dėsnis teisingas ne tik Pizoje, ne tik Galilėjaus laikais, jis teisingas bet kurioje Žemės vietoje, visada buvo ir bus teisingas. Ši dėsnių savybė yra invariantiškumas. Esu kartą pabrėžęs, kad be invariantiškumo principų, panašių į tuos, kurie susiję su Galilėjaus dėsniu, fizika iš viso nebūtų įmanoma. Kitas stebinantis bruožas yra tai, kad mūsų aptariamas dėsningumas nepriklauso nuo daugybės sąlygų, kurios galėtų daryti jam įtaką. Jis teisingas, nesvarbu, ar lyja, ar yra giedra, ar eksperimentas atliekamas kambaryje, ar nuo pasvirusio bokšto, ar akmenis meta vyras, ar moteris. Jis teisingas ir tada, kai tuo pačiu metu iš to paties aukščio akmenis meta du skirtingi žmonės. Akivaizdu, kad yra daugybė kitų sąlygų, kurios, Galilėjaus dėsnių požiūriu, yra nesvarbios. Nepriklausomumas nuo tokio didelio skaičiaus sąlygų, kurios galėtų veikti stebimą reiškinį, taip pat vadinamas invariantiškumu. Tačiau tai kitokio pobūdžio nei anksčiau aptartas invariantiškumas, nes jo negalima suformuluoti kaip bendro principo. Kurios sąlygos daro įtaką reiškiniui, o kurios ne, nustatoma pradinio eksperimentinio tyrimo metu. Pasikliaudamas savo įgūdžiais ir

išradingumu, eksperimentatorius nustato reiškinius, priklausančius nuo santykiškai nedidelio skaičiaus lengvai realizuojamų ir atkuriamų sąlygų. Mūsų atveju esminis žingsnis buvo Galilėjaus sprendimas stebėti sąlygiškai sunkius kūnus. Teisinga teigti, kad jeigu nebūtų reiškinų, priklausančių tik nuo palyginti nedidelio kiekio sąlygų, fizika būtų neįmanoma.

Ne šios dvi aptartosios aplinkybės, nors ir labai svarbios filosofo požiūriu, labiausiai stebino Galilėjų. Jos taip pat nereikia kokio nors specialaus gamtos dėsnių. Gamtos dėsnis tvirtina, kad sunkaus kūno kritimo iš tam tikro aukščio laikas nepriklauso nuo krintančio kūno dydžio, medžiagos ir formos. Pagal antrąjį Niutono dėsni, gravitacijos jėga, veikianti krintantį kūną, proporcinga kūno masei, bet nepriklauso nei nuo kūno dydžio, nei nuo medžiagos, nei nuo formos.

Mūsų svarstymų tikslas — priminti, kad nėra savaime suprantama, jog gamtos dėsniai egzistuoja, tuo labiau, kad žmogus gali juos atskleisti. Prieš kurį laiką turėjau progos atkreipti dėmesį, kad gamtos dėsniai sudaro sluoksnius, kiekvienas sluoksnis apima bendresnius ir visuotinesnius dėsnius nei ankstesnis, jam atskleisti reikia giliau įsiskverbti į visatos sandarą. Tačiau mūsų kontekste svarbiausia tai, kad visi šie dėsniai, turint galvoje ir visas toliausias jų pasekmes, sudaro tik mažą dalį žinių apie negyvąjį pasaulį. Visi gamtos dėsniai yra sąlyginiai teiginiai, kurie remiantis žiniomis apie dabartį leidžia nuspėti kai kuriuos ateities įvykius, nes kai kurie pasaulio dabartinės padėties aspektai, iš tiesų dauguma jų, nėra svarbūs šio nuspėjimo požiūriu. Šių aspektų nereikšmingumas suprantamas ta pačia prasme, kaip aptariant Galilėjaus dėsni.

Gamtos dėsniai visiškai nieko nesako apie dabartinę pasaulio padėtį: apie Žemės, ant kurios gyvename ir kur buvo atlikti Galilėjaus bandymai, apie Saulės ir visos aplinkos egzistavimą. Gamtos dėsniais remiantis galima numatyti ateitį tik tada, kai žinomos visos svarbiausios dabartinės pasaulio padėties determinantės. Įspūdingiausi fizikų laimėjimai — mašinų, kurių veikimą galima numatyti, konstrukcija. Šiose mašinose fizikas sukuria situacijas,

kuriuose visos svarbiausios koordinatės yra žinomos, todėl mašinų elgesį galima numatyti. Tokių mašinų pavyzdžiai — radarai ir branduoliniai reaktoriai.

Svarbiausias mūsų ankstesnių svarstymų tikslas — pabrėžti, kad gamtos dėsniai yra sąlyginiai teiginiai ir jie susiję tik su maža dalimi mūsų žinių apie pasaulį. Pavyzdžiui, klasikinė mechanika, geriausiai žinomas fizikinių teorijų prototipas, remdamasi žinomomis kūnų padėtimis pateikia kūnų padėties koordinačių antrąsias išvestines. Ji nesuteikia jokios informacijos apie šių kūnų egzistavimą, pradines padėtis ar greičius. Dėl tikslumo reikia pasakyti, kad maždaug prieš trisdešimt metų buvo atskleista, jog net sąlyginiai teiginiai negali būti visiškai tikslūs: sąlyginiai teiginiai yra tikimybiniai dėsniai, suteikiantys mums galimybę remiantis dabartine pasaulio padėtimi lažintis dėl būsimų negyvojo pasaulio savybių. Jie neleidžia mums formuluoti kategoriškų teiginių, netgi sąlyginių kategoriškų teiginių, kurių sąlyga — esama pasaulio padėtis. Tikimybiniis gamtos dėsnių pobūdis pasireiškia ir mašinose, jį galima stebėti bent jau mažu galingumu veikiančiuose branduoliniuose reaktoriuose. Vis dėlto papildomas gamtos dėsnių apribojimas, atsirandantis dėl jų tikimybinių prigimties, nebus svarbus tolesniuose mūsų svarstymuose.

Matematikos vaidmuo fizikos teorijose

Apsvarsčius esminius matematikos ir fizikos bruožus, bus lengviau apžvelgti matematikos vaidmenį fizikos teorijose.

Suprantama, matematikos mums kasdien prireikia fizikoje tikrinant gamtos dėsnius, taikant sąlyginius teiginius atitinkamų būdingų arba mums įdomių sąlygų atveju. Kad tai būtų įmanoma, gamtos dėsniai turi būti suformuluoti matematine kalba. Tačiau sukurtų teorijų išvadų tikrinimas nėra svarbiausias matematikos fizikoje vaidmuo. Šiuo požiūriu matematika tėra įrankis.

Matematika fizikoje atlieka kur kas savarakiškesnį vaidmenį. Tai jau išplaukia iš teiginio, kad gamtos dėsniai gali būti taikomosios matematikos objektas, jeigu jie patys suformuluoti

matematine kalba. Teiginys, kad gamtos dėsniai parašyti matematine kalba, iš tikrųjų suformuluotas prieš tris šimtus metų; dabar jis teisingesnis nei bet kada anksčiau. Norėdami atskleisti matematinių sąvokų reikšmę formuluojant fizikos dėsnius, kaip pavyzdį prisiminkime kvantinės mechanikos aksiomas, kurias aiškiai suformulavo didysis fizikas Dirakas. Yra dvi pagrindinės kvantinės mechanikos sąvokos: padėtys ir stebimi dydžiai. Padėtys yra Hilberto erdvės vektoriai, stebimi dydžiai — savijungiai šių vektorių operatoriai. Galimos stebėjimų reikšmės yra charakteringosios operatorių reikšmės — tačiau verčiau čia sustokime, nes kitaip tektų vardyti daugybę tiesinių operatorių teorijos matematinių sąvokų.

Teisinga sakyti, kad fizika pasirenka tam tikras matematines sąvokas gamtos dėsniams formuluoti, tik maža dalis matematinių sąvokų yra taikoma fizikoje. Taip pat teisinga teigti, kad šios sąvokos ne šiaip sau pasirenkamos iš matematinių sąvokų sąrašo, tačiau dažniausiai, jei ne beveik visada, sukuriamos pačių fizikų, o po to pasirodo, kad jau anksčiau jas yra sugalvoję matematikai. Dažnai neteisingai tvirtinama, kad taip atsitinka todėl, kad matematika vartoja pačias paprasčiausias sąvokas, todėl jų yra visose formaliose teorijose. Matematinės sąvokos pasirenkamos ne dėl jų paprastumo — net skaičių pora nėra pati paprasčiausia sąvoka — bet dėl galimybės patogiai manipuliuoti jomis ir taikyti išradingus samprotavimus. Prisiminkime, kad kvantinės mechanikos Hilberto erdvė yra kompleksinė Hilberto erdvė su Hermito skaliarine sandauga. Suprantama, nesusipažinusiems su šiais dalykais žmonėms kompleksiniai skaičiai neatrodo nei natūralūs, nei paprasti, jų nematyti fizikiniuose stebėjimuose. Tačiau kompleksinių skaičių naudojimas šiuo atveju nėra tik taikomosios matematikos skaičiavimų triukas, tai būtina sąvoka kvantinės mechanikos dėsniams suformuluoti. Toliau pradeda aiškėti, kad ne tik kompleksiniai skaičiai, bet ir vadinamosios analizinės funkcijos atlieka svarbų vaidmenį formuluojant kvantinę teoriją. Aš turiu omenyje sparčiai besiplėtojančią išsibarstymo sąryšių teoriją.

Sunku išvengti įspūdžio, kad čia slypi stebuklas, kurį galima palyginti su stebėtinu žmogaus gebėjimu sujungti tūkstančius argumentų į vieną grandinę ir nesusipainioti prieštaravimuose, arba du stebuklai: gamtos dėsnių egzistavimas ir žmogaus proto gebėjimas juos atskleisti. Geriausias paaiškinimas, kurį žinau, kodėl matematinių sąvokų yra fizikoje, tai Einšteino teiginys, kad tik gražias fizikines teorijas mes noriai priimame. Reikia sutikti, kad išradimų protų sukurtos matematinės sąvokos išsiskiria grožiu. Tačiau Einšteino pastaba geriausiu atveju paaiškina, kokias teorijas mes linkę priimti, tačiau nieko nesako apie jų tikslumą. Taigi dabar aptarkime ir šį klausimą.

Ar fizikos teorijų sėkmė iš tikrųjų stebėtina?

Tai, kaip fizikas naudoja matematiką gamtos dėsniams formuluoti, galima paaiškinti tam tikru jo nerūpestingumu. Jeigu jis pastebi, kad dviejų dydžių ryšys panašus į žinomą matematikoje ryšį, jis daro išvadą, kad tas ryšys yra kaip tik toks, nes paprasčiausiai jis nežino kito panašaus sąryšio. Mes nekeliamo sau tikslo paneigti priekaišto, kad fizikas yra tam tikra prasme nerūpestingas asmuo. Galbūt toks jis ir yra. Tačiau svarbu pabrėžti, kad matematinis dažnai gana grubios fiziko patirties formulavimas daugeliu atvejų leidžia itin tiksliai aprašyti didelę reiškinių klasę. Tai rodo, kad matematinė kalba nusipelno daugiau garbės nei šiaip kalba, kuria mes galime kalbėti; tai rodo, kad ji kone tiesiogine prasme yra teisinga kalba. Panagrinėkime keletą pavyzdžių.

Pirmasis — dažnai minimas planetų judėjimo pavyzdys. Kūnų kritimo dėsnius gana gerai pagrindžia eksperimentai, vykdyti daugiausia Italijoje. Šių eksperimentų negalime pavadinti labai tiksliais ta prasme, kuria mes šiandien suprantame tikslumą iš dalies dėl oro pasipriešinimo ir iš dalies dėl to, kad tais laikais nebuvo įmanoma išmatuoti trumpų laiko intervalų. Šiaip ar taip, nenuostabu, kad italų mokslininkai, atlikdami tokius eksperimentus, igijo žinių apie kūnų judėjimą atmosferoje. Būtent Niutonas susiejo kūnų kritimo dėsnius su Mėnulio judėjimu ir pastebėjo, kad tiek mesto nuo

Žemės kūno akmenis judesio trajektorija — parabolė, tiek Mėnulio kelias erdvėje — apskritimas yra atskiri matematinio objekto — elipsės atvejai, ir, remdamasis vienintele ir tais laikais labai apytiksle skaičių sutaptimi, suformulavo universalų gravitacijos dėsni. Filosofiniu požiūriu Niutono suformuluotas gravitacijos dėsnis buvo netikėtas tiek jo laikotarpiui, tiek jam pačiam. Empiriniu požiūriu, jis buvo labai menkai pagrįstas. Formuluoiant jį matematine kalba, buvo naudojama antroji išvestinė; tie, kas bandė kreivei nubrėžti glaudžiamąjį apskritimą, žino, kad antrosios išvestinės sąvoka nėra jau tokia paprasta. Vėliau pasirodė, kad Niutono gravitacijos dėsnis, kurį jis taip sėkmingai nustatė ir galėjo patikrinti 4 procentų tikslumu, galioja mažesniu nei vienos dešimtatūkstantosios procento tikslumu; jis buvo siejamas su absoliutaus tikslumo idėja; tik pastaruoju metu fizikai išdrįso kelti klausimą apie jo tikslumo ribas. Iš tiesų vis minimas ir minimas Niutono dėsnis yra pirmas monumentalus dėsnio, suformuluoto paprastomis, matematiko požiūriu, sąvokomis, pavyzdys, kurio tikslumas peržengia visus lūkesčius. Remdamiesi šiuo pavyzdžiu, suformuluokime tokią išvadą: visų pirma, šis dėsnis yra paprastas tik matematikui, o ne kasdieniam ar nematematiniam protui, jau vien todėl, kad jame naudojama antroji išvestinė; antra, tai sąlyginis labai ribotos veikimo sferos dėsnis. Jis nieko nesako nei apie Žemę, kuri traukia Galilėjaus akmenis, nei apie apskritą Mėnulio orbitą, nei apie planetas ir Saulę. Paaiškinti šias pradines sąlygas paliekama geologams ir astronomams, jiems tenka nelengvas darbas.

Antrasis pavyzdys — iš įprastinės elementariosios kvantinės mechanikos. Ji atsirado, kai Maksas Bornas pastebėjo, kad kai kurios Heizenbergo skaičiavimo taisyklės ir veiksmų su matricomis taisyklės formaliai sutampa. Jas jau seniai buvo nustatę matematikai. Tada Bornas, Jordanas ir Heizenbergas pasiūlė klasikinės mechanikos lygtyse vietos ir laiko kintamuosiuos pakeisti matricomis. Jie pritaikė

matricių mechanikos taisyklės keletui labai idealizuotų problemų ir gavo labai neblogų rezultatų. Tačiau tuo metu dar nebuvo akivaizdu, kad jų matricių mechanika išliks teisinga esant labiau realybę atitinkančioms sąlygoms. Jie sakė: „Būtų gerai, jeigu tokia mechanika, kaip mūsų suformuluota, būtų bent esminiais bruožais teisinga.“ Iš tiesų pirmą kartą jų mechaniką realiai vandenilio atomo problemai po kelių mėnesių pritaikė Paulis. Buvo gauti atitinkantys patirtį rezultatai. Jie buvo patenkinami, tačiau tai dar galima buvo suprasti, nes Heizenbergo skaičiavimo taisyklės buvo išvestos iš uždavinių, susijusių su sena vandenilio atomo teorija. Stebuklas įvyko tada, kai matricių mechanika, arba matematiškai ekvivalenti teorija, buvo pritaikyta problemoms, kurių kontekste Heizenbergo skaičiavimo taisyklės buvo beprasmės. Heizenbergo taisyklių prielaida — kad klasikinės judėjimo lygtys turėtų sprendinius su periodiškumo savybėmis, o helio atomo dviejų elektronų lygtys, arba sunkesnių atomų didesnio skaičiaus elektronų judėjimo lygtys, tokių savybių neturi, taigi šiems atvejams Heizenbergo taisyklės yra nepritaikomos. Tačiau helio žemutinio energetinio lygio skaičiavimai, kuriuos po kelių mėnesių atliko Kinoshita Kornelyje (Cornell) ir Bazley Standartų biure atitinka eksperimentinius duomenis vienos dešimtmilijoninės dalies tikslumu. Iš tiesų, šiuo atveju mes iš lygčių „gavome“ daugiau negu „įdėjome“.

Tą patį galima pasakyti apie kokybines „kompleksinių spektrų“ charakteristikas, t. y. apie sunkiųjų atomų spektrus. Prisimenu pokalbį su Jordanu, kai ką tik buvo nustatyti kokybiniai spektrų bruožai. Jis sakė, kad taisyklių, išvestų iš kvantinės mechanikos teorijos, ir empiriškai nustatytų taisyklių neatitikimas būtų paskutinė galimybė pakeisti matricinės mechanikos struktūrą. Kitais žodžiais tariant, Jordanas jautė, kad jeigu toks neatitikimas helio atomo teorijoje atsirastų, mes bent jau laikinai pasijustumė bejėgiai. Matematinis formalizmas buvo toks vertingas ir nepakeičiamas, kad jeigu minėtas stebuklas su helio atomu nebūtų

įvykęs, būtų kilusi tikra krizė. Žinoma, vienai ar kitaip fizika būtų įveikusi tokią krizę. Kita vertus, teisinga teigti, kad fizika, kokią mes šiandien žinome, nebūtų tokia, jeigu nebūtų nuolat vykę stebuklai, panašūs į stebuklą su helio atomu, kuris galbūt yra pats išpūdingiausias elementariosios kvantinės mechanikos raidoje, bet toli gražu ne vienintelis. Faktiškai tokių stebuklų skaičius priklauso tik nuo to, kiek mes jų norime gauti. Išpūdingi kvantinės mechanikos laimėjimai mus įtikina, kad tai ką mes teigiame, yra teisinga.

Paskutinis pavyzdys yra iš kvantinės elektrodinamikos, arba poslinkių, teorijos. Niutono gravitacijos teorija dar yra akivaizdžiai susijusi su patirtimi, tačiau patirtis formuluojant matricinę mechaniką dalyvauja tik netiesiogiai per Heizenbergo principus. Kvantinė poslinkių teorija, kurią sukūrė Bethe ir Schwinger, yra grynai matematinė teorija, eksperimento vaidmuo apsiriboja matuojamo efekto egzistavimo nustatymu. Skaičiavimai atitinka duomenis mažiau nei vienos tūkstantosios tikslumu.

Šie trys pavyzdžiai, jų galima rasti labai daug, rodo, kad matematinis gamtos dėsnių formulavimas, naudojant tas sąvokas, kuriomis patogiau manipuliuoti, yra tinkamas ir tikslus, šitaip gaunami fantastiško tikslumo, bet griežtai ribotos veikimo srities „gamtos dėsniai“. Aš siūlau laikyti šį teiginį empiriniu epistemologijos dėsniu. Kartu su dėsnių invariantiškumu jis sudaro fizikinių teorijų pagrindą. Be invariantiškumo dėsnių fizikinės teorijos negalėtų remtis faktais; jeigu empirinis epistemologijos dėsnis nebūtų teisingas, mums trūktų paskatinimo ir tikrumo — būtinų emocinių komponentų, kad „gamtos dėsniai“ būtų sėkmingai tyrinėjami. Dr. R. G. Sachsas, su kuriuo aš diskutavau apie empirinį epistemologijos dėsni, pavadino jį fiziko teoretiko pagrindiniu tikėjimo postulatu, ir tai iš tiesų teisinga. Tačiau šį tikėjimo postulatą mes galime paremti pavyzdžiais — daugeliu pavyzdžių.

Fizikos teorijų vienatnumas

Akivaizdu, kad mūsų išvados yra empirinės prigimties. Žinoma, jos nėra jokia „minties būtinybė“, tam pagrįsti visai nebūtina pabrėžti, kad mūsų išvados tinka tik mažai žinių apie negyvąjį pasaulį daliai. Absurdiška manyti, kad matematiškai paprastų reiškinių padėties koordinačių antrajai išvestinei reikšti egzistavimas yra akivaizdus dalykas, juk tokių paprastų išraiškų nėra nei padėčiai, nei greičiui reikšti. Stebėtina, kaip lengvai nuostabi empirinio epistemologijos dėsnių dovana priimama tarsi už dyka. Panaši dovana yra žmogaus proto sugebėjimas sudaryti 1000 samprotavimų grandinę ir nesusipainioti.

Kiekvienas empirinis dėsnis kelia nerimą tuo, kad nėra žinomos jo galiojimo ribos. Mes matėme, kad egzistuoja pasaulio aplink mus dėsningumai, kurie matematiškai gali būti suformuluoti stebėtinu tikslumu. Kita vertus, yra tokių pasaulio aspektų, su kuriais mes nesiejam tikslų dėsningumų. Juos mes pavadiname pradinėmis sąlygomis. Kyla klausimas, ar skirtingi dėsningumai, t. y. skirtingai atskleidžiami gamtos dėsniai susilies į vieną darnią visumą arba bent jau asimptotiškai priartės prie tokios darnos. Priešingu atveju įmanoma, kad visada atsiras tokių gamtos dėsnių, kurie neturės nieko bendro su kitais. Šiuo metu taip galime teigti apie paveldimumo ir fizikos dėsnius. Lieka galimybė, kad kai kurie gamtos dėsniai gali prieštarauti vienas kitam, tačiau taikymo srityse būdami labai įtikinami, mums bus pernelyg naudingi, kad jų atsisakytume. Mes galime susitaikyti su tokia padėtimi arba mūsų noras įveikti skirtingų teorijų prieštaravimus gali išblėsti. Mes galime nustoti siekę „galutinės tiesos“, t. y. vieno paveikslo, į kurį įsiliėtų žinių apie atskirus gamtos aspektus fragmentai.

Šią alternatyvą galima iliustruoti pavyzdžiu. Fizikoje yra dvi labai įdomios ir galingos teorijos: kvantinių reiškinių teorija ir reliatyvumo teorija. Jos nagrinėja labai skirtingus reiškinius. Reliatyvumo teorija taikoma makroskopiniams kūnams — žvaigždėms. Sutapimo arba

susidūrimo įvykis yra pirminis įvykis reliatyvumo teorijoje, jis apibrėžia tašką laike ir erdvėje, bent jau apibrėžtą tokią tašką, jei susiduriančios dalelės būtų be galo mažos. Kvantinės teorijos šaknys — mikroskopiniame pasaulyje ir, šios teorijos požiūriu, susidūrimo įvykis, net jei jis įvyksta su mažomis dalelėmis, nėra pirminis ir negali būti griežtai lokalizuotas laike ir erdvėje. Abi teorijos naudojasi skirtingomis matematinėmis sąvokomis — keturmatės Rymano erdvės ir begaliniamatės Hilberto erdvės. Taigi abi teorijos negali būti suvienytos, nėra tokios matematinės formuluotės, kurios atžvilgiu abi šios teorijos būtų tam tikri artiniai. Visi fizikai tiki, kad abiejų teorijų suvienijimas yra įmanomas ir kada nors įvyks. Tačiau taip pat galima įsivaizduoti, kad taip nebus. Šis pavyzdys iliustruoja dvi visai įsivaizduojamas suvienijimo ir konflikto galimybes.

Bandydami gauti patvirtinimų, kuri iš dviejų alternatyvų labiau tikėtina, galime tarti, kad turime mažiau žinių, t. y. įsivaizduoti, kad mūsų žinių lygis yra žemesnis nei iš tikrųjų. Jeigu šiame žemesniame žinių lygyje teorijas įmanoma suvienyti, galime tikėtis, kad aukštesniame žinių lygyje teorijos irgi susilies. Kita vertus, jei nesuderinamumas atsiranda jau žemesniame lygyje, tikėtina, kad taip bus ir aukštesniame. Žinių ir išradingumo lygis yra tolydus kintamasis, taigi menkai tikėtina, kad mažas šio tolydaus dydžio pokytis sąlygos prieštaringo pasaulėvaizdžio pasikeitimą į darnų. Tačiau tokiam požiūriui prieštarauja tas faktas, kad kai kurios teorijos, apie kurias mes žinome, kad jos neteisingos, labai tiksliai aprašo tam tikrus reiškinius. Jeigu mes neturėtume daugiau žinių, ta reiškinių klasė, kurią „klaidinga“ teorija aprašo, atrodytų mums pakankama, kad pagrįstų teorijos teisingumą. Tačiau tokias teorijas mes laikome klaidingomis tik dėl to, kad jos nesiderina su išsamesniu pasaulėvaizdžiu, jeigu būtų sukurta pakankamai daug tokių teorijų, jos imtų viena kitai prieštarauti. Taigi visai įmanoma, kad tos teorijos, kurias įrodo, mūsų nuomone, pakankamai daug skaitinių duomenų, yra klaidingos, nes nesiderina su platesne teorija, kuri mums dar kol kas nežinoma. Jei tai būtų teisinga, tikėtina, kad didėjant teorijų

skaičiui, atsiras prieštaravimų, kai tik jų nagrinėjamų reiškinių skaičius taps pakankamai didelis. Tai būtų tikras košmaras fizikui teoretikui, besivadovaujančiam savuoju pagrindiniu tikėjimo postulatu.

Panagrinėkime keletą „klaidingų“ teorijų, kurios, nepaisant savo klaidingumo, itin tiksliai aprašo tam tikros grupės reiškinius. Geranoriškai žvelgiant galima nepaisyti kai kurių šių teorijų trūkumų. Ankstyvųjų Boro idėjų apie atomą sėkmė buvo ribota, tą patį galima pasakyti ir apie Ptolemėjaus epiciklus. Galime tiksliai apibrėžti reiškinius, kuriuos šios teorijos aprašo. Tačiau to negalima pasakyti apie vadinamąją laisvųjų elektronų teoriją, kuri pateikia stebėtinai tikslų daugelio, jei ne visų metalų, puslaidininkų ir izoliatorių savybių vaizdą. Pavyzdžiui, ji paaiškina faktą, niekada tinkamai nesuprastą „realios teorijos“, kad izoliatorių varža gali būti 10^{26} kartų didesnė už metalų varžą. Iš esmės nėra eksperimentinių įrodymų, kad izoliatorių varža negali būti begalinė tomis sąlygomis, kuriomis laisvųjų elektronų teorija leidžia tikėtis begalinės varžos. Ir vis dėlto mes esame tikri, kad laisvųjų elektronų teorija tėra grubus priartėjimas, kurį aprašant kieto kūno reiškinius teks pakeisti tikslesniu paveikslu.

Situacija su laisvųjų elektronų teorija kelia laikinumo jausmą, tačiau nepranašauja jokių mums neįveikiamų prieštaravimų. Ji kelia abejones, kiek galime pasikliauti skaitiniais teorijos ir eksperimento duomenų sutapimais, kaip teorijos teisingumo įrodymais. Mes esame įpratę prie tokių abejonių.

Daug sudėtingesnė ir painesnė padėtis susidarytų tuo atveju, jeigu vieną dieną būtų sukurta sąžinės reiškinių teorija arba biologijos teorija, kurios būtų tokios darnios ir įtikinamos kaip dabartinės mūsų negyvojo pasaulio teorijos. Mendelio paveldimumo dėsniai ir genetikos tyrimai gali būti tokios teorijos biologijoje pradžia. Visai įmanoma, kad gali atsirasti abstrakčių argumentų, jog yra prieštaravimų tarp tokių teorijų ir priimtų fizikoje principų. Argumentai gali būti tokie abstraktūs, kad prieštaravimas vienos ar kitos teorijos naudai eksperimento būdu gali būti neišsprendžiamas. Tokia situacija smarkiai sukrėtų pasitikėjimą mūsų teorijomis ir tuo, kad mūsų naudojamos sąvokos atitinka realybę. „Galutinės tiesos“ paieškas ištiktų gili krizė. Priežastis, kodėl tokia situacija yra įmanoma, glūdi tame, kad mes iš esmės nežinome, kodėl mūsų teorijos taip gerai veikia. Jų tikslumas nėra jų teisingumo ir darnos įrodymas. Iš tiesų tai tik autoriaus įsitikinimas, kad kažkas panašaus į aprašytą padėtį įvyktų, jei pasirodytų, kad paveldimumo ir fizikos dėsniai prieštarauja vieni kitiems.

Tačiau noriu užbaigti linksmesne gaida. Tai, kad matematinė kalba taip gerai tinka fizikos dėsniams formuluoti, yra nuostabi dovana, kurios mes gerai nesuprantame, tuo labiau nesame užsitarnavę. Turime būti dėkingi už tai ir tikėtis, kad taip bus ir ateityje, taip pat — kad šia dovana geriau ar blogiau galės naudotis platesnės žinijos sritys.