

Tähän asti yhteensopimattomilta näyttäneiden luonnonlakien sopusointu (1744)

Pierre-Louis Moreau de Maupertuis

Emme voi vaatia, että erilaiset tavat, joita meillä on tietojemme lisäämiseksi, johtaisivat meidät samoihin totuuksiin, mutta olisi kauhistuttavaa nähdä niiden oppilauseiden, jotka filosofia tarjoaa meille perimmäisinä totuuksina, kumoutuvan geometrian päätelmien tai algebran laskelmien kautta.

Mieleenjäävä esimerkki tällaisesta ristiriidasta koskee erästä fysiikan tärkeimmistä kysymyksistä. Tieteiden uudestisyntymisestä asti, jopa tieteiden alusta asti, ei ole tehty kauniimpaa löytöä kuin valon etenemisen lainalaisuudet, kun se kulkee tasaisessa väliaineessa tai kun se kohtaa himmeän kappaleen ja heijastuu sen pinnasta tai kun se taittuu kahden väliaineen rajapinnassa suuntaansa muuttaen. Nämä lait ovat koko valon ja värien tieteen perusta.

Voin paremmin havainnollistaa asiani tärkeyden, jos en ryhdy esittelemään laajaa aihetta kokonaisuudessaan, vaan rajoitun sen johonkin osaan, enkä tarjoa tässä tarkasteltavaksi kuin sen rajoitettuja ja parhaiten tunnettuja kohteita. Totean siis, että kysymys on niistä laeista, joihin perustuu se ihailtava taito, jonka avulla elimistöltään heikentynyt vanhus voi saada takaisin silmiensä näkökyvyn, vieläpä paremman näkökyvyn kuin se, jonka luonto hänelle lahjoitti. Kysymys on tieteestä, joka laajentaa näkökykymme avaruuden ääriin ja joka mahdollistaa aineen pienimpien osasten tarkastelun ja jonka avulla löydämme kohteita, joiden näkemisen luulimme ihmiseltä kielletyksi.

Valon liikettä säätelevät lait tasaisessa väliaineessa tai sen kohdatessa kappaleen, johon se ei voi tunkeutua, on tunnettu jo ammoin. Sen sijaan se laki, jota valo noudattaa siirtyessään väliaineesta toiseen, tuli tunnetuksi vasta viime vuosisadalla: Snellius keksi sen, Descartes otti tavoitteekseen selittää sen, ja Fermat hyökkäsi hänen selitystään vastaan. Noista ajoista asti

tämä aihe on ollut suurimpien geometrikkujen tutkimuksen kohteena, mutta kyseistä lakia ei ole onnistuttu saattamaan sopusointuun sellaisen toisen lain kanssa, jota luonto noudattaisi vielä rikkumattomammin.

*

Tässä ovat lait, joita valo tottelee:

Ensimmäinen laki on, että *tasaisessa väliaineessa valo kulkee suoraviivaisesti.*

Toinen laki on, että *kun valo kohtaa kappaleen, johon se ei voi tunkeutua, se heijastuu, ja että heijastuskulma on yhtä suuri kuin tulokulma.* Toisin sanoen heijastumisen jälkeen valo muodostaa kappaleen kanssa saman kulman kuin se missä se kappaleen kohtasi.

Kolmas laki on, että *kun valo etenee yhdestä väliaineesta toiseen, sen rata uuden väliaineen kohdatuun muodostaa kulman aikaisemman radan kanssa, ja että taittumiskulman sini on aina samassa suhteessa tulokulman sinin kanssa.* Jos esimerkiksi valonsäde kulkee ilmasta veteen ja taittuu siten, että taittumiskulman sini on kolme neljäsosaa tulokulman sinistä, niin tulipa se vedenpintaan miten kaltevasti tahansa, sen taittumiskulman sini on aina kolme neljäsosaa tulokulman sinistä.

Ensimmäinen laki on yhteinen valolle ja kaikille kappaleille: ne etenevät suoraviivaisesti, ellei jokin ulkoinen voima pakota niitä muuttamaan suuntaansa.

Toinen laki on sama kuin se, jota kimmoisa kuula noudattaa osuessaan periksiantamattomaan pintaan. Mekaniikka osoittaa, että kuula, joka kohtaa sellaisen pinnan, kimpoaa samassa kulmassa kuin missä se tuli, ja samalla tavalla tekee valo.

Mutta tarvitaan paljon vaivannäköä, ennen kuin kolmas laki voidaan selittää yhtä yksinkertaisesti. Kun valo kulkee yhdestä väliai-

neesta toiseen, havaitaan aivan erilaisia ilmiöitä, kuin jos kuula lävistää erilaisia väliaineita. Kuinka taittumista yritetäänkään selittää, kohdataan ylittämättömiksi osoittautuneita vaikeuksia.

En luettele kaikkia niitä suurmiehiä, jotka ovat työskennelleet tämän aiheen kimpussa. Heidän nimensä muodostaisivat runsaan luettelon, joka olisi tämän tutkielman hyödytön koriste, ja heidän esittämiensä systeemien kuvailemisessa olisi valtava työ. Tyydyinkin jakamaan kolmeen luokkaan kaikki selitykset, joita tutkijat ovat esittäneet valon heijastumisesta ja taittumisesta.

Ensimmäinen luokka käsittää niiden selitykset, jotka ovat koettaneet johtaa heijastumisen ja taittumisen lait ainoastaan mekaniikan yksinkertaisimmista ja tavallisimmista periaatteista.

Toinen luokka käsittää ne selitykset, jotka mekaniikan periaatteiden lisäksi edellyttävät valon pyrkivän ainetta kohti, johtuipa se aineen vetovoimasta tai jostakin muusta halutun kaltaisesta syystä.

Lopulta kolmas luokka käsittää ne selitykset, jotka on johdettu metafyyysisistä periaatteista eli niistä laeista, joiden valtaan näyttää itse Luonnon alistaneen sellainen korkeampi Äly, joka aina pyrkii toimimaan mahdollisimman yksinkertaisesti.

Descartes ja hänen seuraajansa kuuluvat ensimmäiseen luokkaan; he ovat tarkastelleet valon liikettä kuin kuulaa, joka kohdatessaan peräänantamattoman pinnan kimpoaa siitä ja joka kohdatessaan peräänantavan pinnan lävistää sen muuttaen ainoastaan suuntaansa. Jos kohta se tapa, jolla tuo suuri filosofi yritti selittää kyseiset ilmiöt, onkin epätäydellinen, sen ansiona on hänen pyrkimyksensä johtaa ne ainoastaan yksinkertaisimmasta mekaniikasta.

*

Useat matemaatikot ovat huomauttaneet loogista virheistä, joita Descartes ei ollut havainnut, ja osoittaneet hänen selityksensä puutteet.

Newton näki turhaksi selittää taittumisilmiöitä sillä, mitä kappaleelle tapahtuu, kun se törmää esteisiin tai kun sitä vedetään väliaineissa, joiden vastus muuttuu. Niinpä hän turvautui vetovoimalakiinsa. Tämä kaikissa kappaleissa vaikuttava voima on suhteessa niiden ainemäärään, ja selittää, kun se kerran on hyväksytty, taittumisilmiöt mitä tarkimmin ja selkeimmin. Herra Clairaut on tälle aiheelle omistamassaan loistavassa tutkielmassa, ei ainoastaan paljas-

tanut kartesiolaisen selityksen riittämättömyyden, vaan olettaen valon pyrkivän himmeitä kappaleita kohti, mikä johtuisi jonkinlaisesta vetovoiman tapaan vaikuttavasta "ilmakehästä", johtanut taittumislait selkeydellä, joka on ominainen hänen kaikille tutkimuksilleen.

Fermat oivalsi ensimmäisenä Descartes'n selityksen puutteellisuuden. Hän ilmeisesti myös ymmärsi turhiksi yritykset johtaa taittumislait kuulasta, jota törmäytetään esteisiin tai työnnetään erilaisissa väliaineissa. Hän ei silti turvautunut kappaleita ympäröiviin "ilmakehiin", eikä vetovoimaankaan, vaikka tiedämme, ettei tämä periaate ollut hänelle tuntematon eikä vastenmielinen. Hän etsi kyseisten ilmiöiden selitystä täysin erilaisesta, puhtaasti metafyyysisestä periaatteesta.

Kaikki tiedämme, että kun valo tai jokin kappale kulkee pisteestä toiseen suoraa viivaa pitkin, se kulkee lyhintä reittiä ja lyhimmissä ajassa.

Tiedetään myös, tai ainakin voidaan helposti osoittaa, että kun valo heijastuu, se edelleen kulkee lyhintä tietä ja joutuisimmassa ajassa. Voidaan osoittaa, että kuulan, jonka on kuljettava pisteestä toiseen ja tasosta heijastuen, on lyhintä mahdollista reittiä ja lyhimmissä mahdollisessa ajassa kulkeakseen muodostettava heijastustasossa yhtä suuret tulokulma ja heijastuskulma. Jos näet nämä kaksi kulmaa ovat yhtäsuuria, niiden viivojen summa, joita pitkin kuula saapuu ja lähtee, on lyhyempi kuin minä tahansa kahden muun viivan yhteenlaskettu pituus, jotka muodostaisivat erisuuret kulmat.

*

Näin on siis käsitelty valon suoraviivainen liike ja heijastuminen; ne näyttävät noudattavan metafyyysisistä lakia, jonka mukaan *Luonto aikaansaadessaan ilmiöitään aina käyttää yksinkertaisimpia keinoja*. Jos kappaleen on kuljettava pisteestä toiseen kohtaamatta estettä tai jatkettava matkaansa läpikulkemattoman esteen kohdattuaan, Luonto kuljettaa sitä lyhintä tietä ja joutuisimmassa ajassa.

Soveltaaksemme tätä periaatetta taittumiseen tarkastelkaamme kahta valoa läpäisevää väliainetta, joita erottaa yhteinen välipinta. Olettakaamme että piste, josta valonsäde lähtee, sijaitsee yhdessä väliaineessa ja piste, johon valonsäde päättyy, toisessa. Älköön pisteitä yhdistävä suora viiva kuitenkaan olko kohtisuorassa välipintaa vasten. Olettakaamme vielä, mistä se sitten johtuukin, että valo kulkee eri nopeudella kussakin väliaineessa. On selvää, että pisteitä yhdistävä suora viiva on aina lyhin niiden väli-

nen reitti, mutta ajan puolesta se ei ole joutuisin reitti. Koska aika riippuu eri nopeuksista, joita valolla on eri väliaineissa, säteen on, mikäli haluamme sen kulkevan mahdollisimman joutuisasti, taituttava välipinnassa siten, että suurempi osa reitistä sijoittuu siihen väliaineeseen, jossa valo kulkee nopeammin, ja pienempi osa siihen, jossa valo kulkee hitaammin.

Näin valo näyttää tekevän kun se kulkee ilmasta veteen; valonsäde taittuu siten, että suurempi osa reitistä sijoittuu ilmaan ja pienempi osa veteen. Jos siis, kuten on melko järkevää olettaa, valo etenee nopeammin harvoissa kuin tiheissä aineissa; jos se liikkuu nopeammin ilmassa kuin vedessä, se noudattaa odotetunkaltaista reittiä ennättääkseen mahdollisimman joutuisasti lähtöpisteestä päätepisteeseensä.

Tällä periaatteella Fermat ratkaisi ongelman; tällä niin uskottavalla periaatteella, että valo, joka edetessään suoraan ja heijastuessaan aina kulkee joutuisinta reittiä, tekee niin myös taittuessaan. Hän ei epäröinyt otaksua, että valo kulkee helpommin ja nopeammin harvoissa väliaineissa kuin niissä, joissa se samaa tilavuusyksikköä vastaten kohtaa enemmän ainetta. Todellakin: voisimmeko ensi kädessä uskoa, että valo läpäisisi helpommin ja nopeammin kiteen tai veden kuin ilman tai tyhjiön?

Myös monet kuuluisat matemaatikot olivat samaa mieltä Fermat'n kanssa. Leibniz on se, joka antoi hänelle suurimman tunnustuksen, sekä nimellään että ongelman tekemällä elegantilla analyysillä. Hän ihastui metafyyseen periaatteeseen ja *perimmäisten syiden* löytymiseen siinä määrin, että piti kiistämättömänä tosiasiana valon nopeampaa etenemistä ilmassa kuin vedessä tai lasissa.

Asianlaita on kuitenkin päinvastoin; Descartes esitti ensimmäisenä, että valo liikkuu nopeimmin tiheimmissä aineissa, ja vaikka hänen siitä johtamansa taittuminen selitys oli riittämätön, sen puutteet eivät johtuneet hänen tekemästään oletuksesta. Kaikki systeemit, jotka tarjoavat taittuminen uskottavan selityksen, edellyttävät paradoksia tai vahvistavat sen.

*

Kun olemme myöntäneet tosiasian, että *valo liikkuu nopeimmin tiheimmissä väliaineissa*, koko Fermat'n ja Leibnizin rakennelma luhistuu. Kun valo kulkee erilaisissa väliaineissa, se ei kulje lyhintä reittiä eikä joutuisimmassa ajassa; säde, joka kulkee ilmasta veteen edeten suurimman osan reitistään ilmassa, saapuu myöhemmin kuin jos se kulkisi ilmassa lyhyemmän matkan.

Herra de Mairanin heijastumisesta ja taittumisesta kirjoittamasta tutkielmasta voimme nähdä Fermat'n ja Descartes'n käymän kiistan historian sekä sen hämmennyksen ja voimattomuuden, jonka vallassa tähän asti ollaan oltu yritettäessä saada taittumislakia yhteensopivaksi metafyyseen periaatteen kanssa.

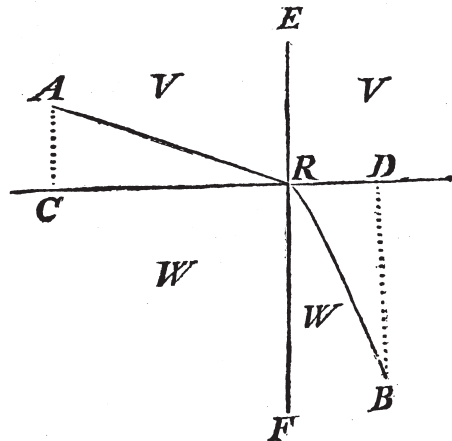
Mietittyäni perusteellisesti tätä kysymystä tulin ajatelleeksi, että koska valo kulkiessaan väliaineesta toiseen poikkeaa lyhimmältä reitiltä, joka on suora viiva, se saattaa yhtä hyvin poiketa myös joutuisinta aikaa vastaavalta reitiltä. Todellakin, miksi ajan pitäisi olla erikois- asemassa verrattuna avaruuteen? Koska valo ei voi samanaikaisesti kulkea sekä lyhintä että joutuisinta reittiä, miksi se valitsisi näistä vaihtoehdoista yhden pikemmin kuin toisen? Ja jos se ei seuraa kumpaakaan näistä, se noudattaa reittiä, johon liittyy todellisempi etu: *valo kulkee reittiä, johon liittyy vaikutuksen suure on pienin.*

*

Nyt minun on selitettävä, mitä tarkoitan vaikutuksen suureella. Kun kappale liikkuu pisteestä toiseen, siihen tarvitaan tietty *vaikutus*, ja tämä vaikutus riippuu sekä kappaleen nopeudesta että sen kulkemasta matkasta, mutta se ei ole yhtä kuin nopeus eikä matka erillisinä tarkasteltuina. Vaikutus on sitä suurempi mitä suurempi kappaleen nopeus on ja mitä suurempi sen kulkema matka on; se on verrannollinen summaan kappaleen kulkemista matkoista, joista kukin on kerrottu sitä vastaavalla kulkunopeudella.

Juuri tämä vaikutuksen määrä on Luonnon todellinen kustannus, jota se valon liikkuessa mahdollisimman taloudellisesti säästää.

Olkoon meillä kaksi väliainetta, joita erottaa suoran CD edustama yhteinen välipinta. Olkoon valon nopeus sen yläpuolisessa väli-



nessa = V ja alapuolisessa väliaineessa = W. Tarkastellaan valonsädettä AR, joka lähtee annetusta pisteestä A ja jonka on määrä päästä anettuun pisteeseen B.

Löytääkseni pisteen R, jossa säteen on taituttava, etsin sellaista taittumispistettä, jota vastaavan vaikutuksen määrä on pienin mahdollinen. Näin ollen suureen V. AR + W. RB on oltava *minimi*, eli

$$V\sqrt{AC^2 + CR^2} + W\sqrt{BD^2 + CD^2 - 2CD.CR + CR^2} = \text{minimi.}$$

Koska AC, BD ja CD ovat vakioita, saamme

$$\frac{V.CR.dCR}{\sqrt{AC^2 + CR^2}} - \frac{W.(CD - CR).dCR}{\sqrt{BD^2 + DR^2}} = 0$$

eli

$$\frac{V.CR}{AR} = \frac{W.DR}{BR}$$

eli

$$\frac{CR}{AR} : \frac{DR}{BR} = W : V.$$

Toisin sanoen tulokulman sinin ja taittumiskulman sinin suhde on yhtä kuin valonnopeuksien käänteinen suhde vastaavissa väliaineissa.

Kaikki valon etenemiseen liittyvät ilmiöt noudattavat nyt yhtä suurta periaatetta, nimittäin sitä, että *Luonto saa ilmiönsä aikaan käyttäen yksinkertaisimpia keinoja*. Tästä periaatteesta seuraa, että kun valo kulkee väliaineesta toiseen, sen tulokulman sini ja taittumiskulman sini ovat käänteisesti samassa suhteessa kuin valon nopeudet kyseisissä väliaineissa.

Mutta miten on, säästääkö Luonto tätä vaikutuksen suuretta, jota se kuluttaa mahdollisimman niukasti valon kulkiessa eri väliaineissa, myös silloin kun valo heijastuu himmeistä kappaleista tai etenee suoraan? Kyllä: kyseinen suure on aina pienin mahdollinen.

Sekä heijastumisen että suoraan etenemisen tapauksessa, valon nopeuden pysyessä muuttumattomana, pienin vaikutus antaa samanaikaisesti sekä lyhimmän että joutuisimman reitin. Mutta tämä lyhin ja joutuisin reitti on vain seurausta pienimmästä vaikutuksesta, kun taas Fermat ja Leibniz erehtyivät pitämään seurausta periaatteena.

Kun todellinen periaatteena nyt on löytynyt, voin johtaa siitä kaikki valon etenemistä koskevat lait, niin suoraan etenemisen, heijastumisen kuin taittumisen. Jätän kuulijakunnalle tarkasteltavaksi esittämäni geometrisen todistuksen.

*

Tiedän sen vastenmielisyyden, jota monet matemaatikot tuntevat, kun *perimmäisiä* syitä sovelle-

taan fysiikkaan, ja hyväksyn sen itsekin tiettyyn rajaan saakka. Myönnän, ettei ole vaaratonta tuoda niitä tarkasteluun. Erehdys, johon Fermat ja Leibniz päätyivät, todistaa parhaiten, miten vaarallista niiden käyttö on. Voimme kuitenkin sanoa, ettei heitä erehdyttänyt itse periaatteena, vaan se hätäily, jolla he hyväksyivät periaatteeksi sen, mikä olikin vain sen seurausta.

Emme voi epäillä, etteikö tätä kaikkea olisi säättänyt Korkein Ollento, joka asetettuaan aineeseen ne voimat, jotka todistavat Hänen väkevyystään, tarkoitti aineen saavan aikaan ilmiöitä, jotka todistavat Hänen viisautestaan. Näiden kahden attribuutin harmonia on niin täydellinen, että varmaankin kaikki Luonnon ilmiöt voitaisiin johtaa niistä. Välttämätön ja sokea mekaniikka noudattaa valistuneimman ja vapaimman Älyn aivoitusta, ja jos meidän henkemme olisi kyllin valtava, se näkisi myös fyysikaalisten ilmiöiden syyt joko laskemalla kappalten ominaisuudet tai tutkimalla mikä parhaiten saa ne toteutumaan.

Ensimmäinen näistä keinoista on parhaiten ulottuvillamme, mutta ei johda meitä pitkälle. Toinen johtaa meidät toisinaan harhaan, koska emme tiedä kyllin hyvin, mikä on Luonnon tarkoitus, ja koska saatamme erehtyä siitä *suureesta*, jota meidän tulee tarkastella Luonnon *kustannuksina* sen tuottaessa ilmiöitä.

Yhdistääksemme tutkimuksissamme yleisnäköisyyden ja varmuuden meidän tulee käyttää molempia keinoja. Laskekaamme kappalten liikkeitä, mutta tutkikaamme myös sen Älyn aivoituksia, joka panee ne liikkeeseen.

Näyttää siltä, että entisaikojen filosofit tekivät ensimmäiset yritykset tämänkaltaisen matematiikan perustamiseksi: he etsivät lukujen ja kappalten suhteista metafysisiä merkityksiä, ja kun he sanoivat, että Jumala on yhtä kuin Geometria, he varmaankin tarkoittivat, että tämä tiede vertaa Hänen väkevyytensä aikaansaannoksia Hänen viisautensa näkyihin.

He eivät kuitenkaan olleet tarpeeksi hyviä geometrikkoja ryhtyäkseen asettamaansa tehtävään; meille on jäänyt paljon huonosti perusteltua ja käsittämätöntä. Se täydellisyys, jonka tämä tiede on heidän jälkeensä saavuttanut, tarjoaa meille mahdollisuuden onnistua paremmin ja kukaties hyvittää sen etumatkan, joka entisajan suurilla neroilla oli meihin verrattuna.

Lähde: Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Pariisi, 15. huhtikuuta 1744. Suomennos: Osmo Pekonen.