

Artikkeli kirjassa "Saako ihminen vastauksen", toim. L. Pinomaa.
WSOY, Helsinki, 1967, 7–58.

SAAKO IHMINEN VASTAUKSEN

*Fyysikko, biologi, filosofi ja teologi
etsivät maailmankuvaa*

Kirjoittaneet

KAARLE KURKI-SUONIO

ERKKI KIVI

GEORG HENRIK von WRIGHT

LENNART PINOMAA

Toimittanut Lennart Pinomaa

PORVOO • HELSINKI

WERNER SÖDERSTRÖM OSAKEYHTIÖ

KAARLE KURKI-SUONIO

Ajatuksia fysiikasta ja maailmankuvasta

» Jos joku luulee jotakin tietävänsä, ei hän vielä tiedä, niinkuin tietää tulee.»

Paavali (1 Kor. 8: 2)

Maailmankuva ja luonnontiede

Ihmisen omalaatuisimpia tunnusmerkkejä on halu ymmärtää. Kaikelle mitä on tai tapahtuu pitää löytää selitys. Monet pitävät tätä älyllistä uteliaisuutta luonnontieteiden synnyn ja kehityksen alku syynä ja katsovat, että sen tyydyttäminen on tutkimuksen varsinainen tehtävä. Ainakin yhtä oikeassa lienevät ne, jotka selittävät, että tiede on syntynyt käytännöllisten tehtävien vaatimuksista ja elää vain siksi, että tieto on valtaa – ja valta rahaa. Olipa pohjimmainen vaikutin mikä tahansa, ilmeistä on kuitenkin, että erääksi tieteen keskeisimmistä tavoitteista on asetettu sellaisen kokonaisnäkemyskehittämisen, jonka perusteella kaikki olemassa oleva ja tapahtuva tulee ymmärrettäväksi – eli lyhyesti, maailmankuvan muodostaminen.

Vuosisatoja ovat tutkijat suhtautuneet tähän tehtävään varsin toiveikkaasti, ja on toki myönnettävä, että paljon on saatu selville. Tieteeseen kuuluu kuitenkin olennaisesti jatkuva itsekritiikki. Ilman sitä luisuttaisiin auttamatta pelkkään hyödyttömään spekulointiin. Luonnontieteiden edistyminen merkitsee siten välttämättä paitsi tiedon lisääntymistä myös yhä selvenevää tietoisuutta omista rajoituksista. Nykyisin olemme paremmin kuin koskaan ennen selvillä siitä, mitä yleensä on mahdollista osoittaa todeksi ja mitä ei. Monet tutkijat ovat kokeneet nämä rajoitukset niin voimakkaina, että ovat niiden vuoksi halunneet jopa kokonaan sanoutua irti maailmankuvan rakentamisesta. Tämä asenne kuvastuu selvästi siitä usein esitetystä väitteestä, ettei luonnontieteen nimessä ole lupa sanoa mitään järjestettyjen tieteellisten havaintojen tai kokeiden ulkopuolisista luonnon tapahtumista.

Jos haluamme muodostaa täysin tieteellisen maailmankuvan, saamme hyväksyä tähän kuuluvaksi vain sen, mikä on luonnontieteellisesti todistettavissa. Kokoelma varmoja tieteen tuloksia tuskin kuitenkaan riittää tyydyttämään kenenkään ymmärtämisen tarvetta, vaikka ne pystyttäisiinkin esittämään yleisesti tajuttavassa muodossa. Sellaisenaan ne ovat sirpaletietoa. Sitä paitsi luonnontieteellisen tietämyksen määrä on jo kauan sitten ylittänyt etevimmänkin yksityisen ihmisen hallintakyvyn, ja se kasvaa kiihtyvästi. On laskettu, että noin 99 prosenttia kaikista maailman fyysikoista elää juuri nyt. Täysin tieteellinen maailmankuva on ilmeinen mahdottomuus.

Käytännössä ongelma näyttää oikeastaan aivan toisenlaiselta. Ihmisellä on kai aina ollut jonkinlainen valmis yleiskäsitys maailmasta, ja tieteen tehtäväksi on jäänyt lausua siitä mielipiteensä, mikäli tätäkään on suvaittu. Parantelemalla ja uudistamalla omaksuttua kuvaa tutkimustulosten mukaisesti voidaan ajatella saavutettavan maailmankuva, joka ei ainakaan ole ristiriidassa tieteen kanssa. Tällaiselta kavalta on edellytettävä hyvin suurta joustavuutta. Sen pitäisi olla aina valmis muuttumaan ja kehittymään tieteen edistyessä, mikä on käytännössä osoittautunut

lähes ylivoimaiseksi. Inhimillisellä ajattelulla on kankea mukautumiskyky. Sitä paitsi meillä on suuri taipumus tunnepitoiseen suhtautumiseen. Rakastamme omaksumiamme käsityksiä ja vihaamme uusia, joita emme ymmärrä. Emme voi kovin ankarasti tuomita kirkkoa, joka esti Galilein ja Kopernikuksen oppien opettamisen, emmekä puoluetta, joka filosofiansa perusteiden vuoksi kielsi kvanttimekaniikan. Ilmiö on pienemmässä mittakaavassa jokapäiväinen ja koskee kaikkia, jopa tiedemiehiä itseään. »Hyvin harvoin tärkeä tieteellinen uudistus raivaa tiensä voittamalla vähitellen puolelleen ja vakuuttamalla vastustajansa. Harvoin sattuu, että Saulista tulee Paavali. Tapahtuu ainoastaan, että vastustajat aikanaan kuolevat yksi kerrallaan ja kasvava sukupolvi alusta asti tutustuu uusiin ajatuksiin» (Max Planck).

Maailmankuva on aina suureksi osaksi mielikuvituksen ja uskomusten varaan rakennettu kokonaisuus. Siihen kerta kaikkiaan käsitetään kuuluvaksi paljon selalaista, mistä ei luonnontieteellisen tutkimuksen avulla voi tietoa saadakaan. Siten jää maailmankuvan rakentajille varsin suuri ajatuksen- ja uskonvapaus – suuremoiset mahdollisuudet oppiriitoihin ja uskonsotiin. Tämä vapaus ei ole mielivaltaa, mutta sitä vallitseva kysymys objektiivisen tiedon rajoituksista on hyvin vaikeasti lähestyttävä. Huomattakoon, etteivät tieteenkään esittämät käsitykset ole aina varmiksi todistettuja tuloksia vaan useinkin hypoteeseja ja teorioita, joita ei ehkä koskaan pystytäkään todistamaan. Todellinen tieto ja inhimilliseen ajatteluun nojautuvat ainekset saattavat olla niissä lähes erottamattomasti toisiinsa kietoutuneina. Luonnontieteen edistyminen edellyttää jatkuvaa rajankäyntiä näiden kahden välillä. Saman vaikean tehtävän edessä olemme myös joka kerran pyrkiessämme tarkastelemaan erilaisten maailmankuvien tieteellistä mielekkyyttä.

Juuri inhimillinen ajatus tai mielikuvitus pyrkii yhdistämään hajanaiset yksityistiedot laajemmiksi kokonaisuuksiksi, kun se etsii tietä ymmärrykseen. Merkittävästi näyttää tähän pyrkimykseen kytkeytyvän ajatuksen omaa vapautta uhkaava vaara. Mitä ehjemmäksi ja kokonaiseemmaksi maailmankatsomus onnistutaan rakentamaan, sitä vaikeampaa ajatuksen on irrottautua siitä ja sitä hankalampaa on korjata sitä uusien tutkimustulosten mukaan. Luonnontieteen tietopuolinen aines ei sinänsä välttämättä edellytä tällaista tajuttavaa kokonaisuutta. Pikemminkin joudutaan nykyisten tutkimustulosten valossa epäilemään, onko lainkaan mahdollista, että luonnontieteen kanssa sopusoinnussa oleva maailmankuva täyttäisi sille asetetun ensimmäisen perusvaatimuksen, vaatimuksen olla ymmärrettävä ja tehdä ymmärrettäväksi.

Fysiikka ja ymmärtäminen

Luonnontieteiden perinteisen jaottelun mukaan fysiikka tutkii yleensä elotonta luontoa ja kaikkia sen ilmiöitä. Fysiikan piiriin mahtuu siten suunnaton määrä ongelmia, aina maailmankaikkeuden pienimmistä osasista sen laajimpien kokonaisuuksien käsittämättömiin mittasuhteisiin asti. Se on tyypillinen luonnontiede. Melkein kaikki, mitä sen yleisistä periaatteista, tavoitteista ja menetelmistä voidaan sanoa, soveltuu muihinkin luonnontieteisiin.

Varsin yleinen – eikä aivan perusteeton – on käsitys, jonka mukaan fysiikka muodostaa kaikkien luonnontieteiden pohjimmaisen perustan. Ainakin sen alaan kuuluvat luonnon alkeellisimmat perusilmiöt. Se on myös rakenteeltaan täydellisin ja luonnontieteen perusolemus ilmenee siinä selvimmin, koska siinä on voitu seura-

ta ehdottoman luotettavuuden vaatimusta pisimmälle. Siksi se on myös joutunut historiansa aikana monesti tiennäyttäjäksi tieteellistä ajattelutapaa kehitettäessä.

Maailmankuvan kannalta on tärkeää, että fysiikka pyrkii selittämään tarkastelemansa ilmiöt. Jotta voitaisiin oikein arvostella tutkimuksen merkitystä, olisi nähtävä, millaisia selityksiä se etsii ja millainen ymmärtäminen sen avulla on mahdollista.

Luonnontieteet etsivät perusnäkemysensä mukaisesti kaiken olemisen ja tapahtumisen selityksiä vain luonnosta itsestään. Luonnon ulkopuoliset syyt eivät kerta kaikkiaan ole luonnontieteellisiä syitä. Luonnon objektien ominaisuudet ja luonnonilmiöt ajatellaan ymmärretyiksi, jos saadaan selville, miten ne muodostuvat yksinkertaisemmista rakenneosista ja alkeellisemmista ilmiöistä. Tämä analysoiva selitystapa on osoittautunut menestykselliseksi hyvinkin monimutkaisten ilmiöiden tarkastelussa. Niinpä nykyaikaisen biofysiikan tutkimustulokset osoittavat, että fysikaalisilla perusilmiöillä on tärkeä merkitys myös biologian alueella. Monet jopa uskovat, että kaikki elollisenkin luonnon ilmiöt voidaan selittää pelkästään niiden avulla. Jos näin olisi, kaikki luonnontiede olisikin pohjimmaltaan pelkkää fysiikkaa.

Fysiikan näkemysen ydin on *luonnonlakiajattelu*. Ilmiöiden ajatellaan riippuvan täysin tietyllä tavalla niihin osaaottavien objektien ominaisuuksista ja vallitsevista olosuhteista, niin että ilmiöt tapahtuvat samoissa olosuhteissa aina samoin. Oikeastaan tämän ajattelutavan juuret ovat syvällä ihmisen henkisessä perusrakenteessa. Sillä on selvä yhteys yleiseen hahmotuspyrkimykseen. Ilmeisesti kuitenkin myös ulkopuolisessa luonnossa itsessään on aihetta siihen. Jo se, että on mahdollista puhua kappaleiden tietyistä ominaisuuksista ja tietyistä ilmiöistä silloin, kun on kysymys eri kappaleista ja tapahtumista eri aikoina ja eri paikoissa, perustuu luonnon säännönmukaisuuksiin. „Ilmiö» merkitsee, että jotakin tapahtuu, ainakin yksi havaittava suure muuttuu. Jo puhuessamme tietystä ilmiöstä edellytämme tapahtumilta tiettyjä tunnuspiirteitä, toisin sanoen sitä että ilmiössä suureiden muuttuminen noudattaa joitakin meidän tuntemiamme yleisiä linjoja. Puhumalla ilmiöön osaaottavista objekteista me ilmaisemme, että on aina myös suureita, jotka pysyvät muuttumattomina eli siis ovat invariantteja. Kaikki tällaiset säännönmukaisuudet ymmärretään seurauksiksi luonnonlaeista, jotka määräävät mikä muuttuu ja miten ja myös sen mikä ei muutu, kun jotakin tapahtuu. Täysin ilman säännönmukaisuuksia olisi jokainen tapahtuma ainutkertainen ja ainutlaatuinen. Sellaista tapahtumista olisi mahdotonta tutkia fysiikan keinoin. Sille ei voisi antaa edes minkään ilmiön nimeä. Jos sellaista esiintyy, se jää täysin luonnontieteen ulkopuolelle.

Fysikaalinen ymmärtäminen on mahdollista täsmälleen niin pitkälle kuin maailman selittäminen perusobjektien, perusilmiöiden ja niitä hallitsevien perusluonnonlakien avulla onnistuu. Fysiikan tulee selvittää, minkä laatuista nämä peruseikat ovat sekä miten ja missä määrin niiden avulla voidaan luontoa ja sen tapahtumia selittää. Keskeisen merkityksen saavat tällöin ne luonnonlait, jotka ilmaisevat suureiden pysyvyyden, ns. säilymislait; niiden avulla voidaan näet täsmentää intuitiivista puhetta perussuureista ja suureiden alkeellisyydestä. Mitä pysyvämpi suure tai objekti on, sitä perusluonteisemmaksi se tajutaan ja sitä suurempi merkitys sille joudutaan antamaan fysikaalisessa käsitteenmuodostuksessa. Maailmankuvan rakentajan tarve päästä perille havaittavien objektien ja ilmiöiden perusolemuksesta johtaa näin etsimään mahdollisimman yleisiä ja ehdottomia invariansseja.

Voidaan kysyä, onko fysikaalinen ymmärtäminen todellista ymmärtämistä, mutta tällöin joudutaan pohdiskeluun, joka on kokonaan fysiikan oman alueen ulkopuolella. Näyttää siltä, että alkeellisempiin objekteihin nojaava selitys johtaa vain uusiin alkuperäisen kaltaisiin ongelmiin. Kun esimerkiksi aineen rakennetta ja ominaisuuksia alettiin ymmärtää sen atomien avulla, jouduttiin kysymään atomien omaa rakennetta. Ne eivät olleetkaan muuttumattomia perusosasia. Sitten opittiin tuntemaan atomin elektroniverho ja ydin. Mutta ytimelläkin osoittautui olevan oma, nykyisin jo varsin hyvin ymmärretty rakenne. Sen rakenneosasten, protonien ja neutronien, tutkimus on hyvin nopeassa tahdissa johtanut yhä uusien alkeishiukkasten löytymiseen, ja nykyisin on hyvin voimakkaasti esillä kysymys näiden mahdollisesta rakenteesta. Kaikkein alkeellisimpiin suu reisiin ja pysyvimpiinkin invariansseihin liittyy heti niiden olemusta ja alkuperää koskeva kysymys. Ketju näyttää päättymättömältä.

Voidaan kyllä ajatella, että jokainen uusi edistysaskel merkitsee syvempää ymmärtämistä. Varmasti me tunnemme ja ymmärrämme luonnonilmiöiden luonteen paljon paremmin kuin Aristoteles aikoinaan. Emme mitenkään voi pitää kaikkea fysiikan avulla saavutettua ymmärtämistä näennäisenä, jos esimerkiksi ajatellaan siitä veronutua teknistä kehitystä. Fysiikan teoriaan ei myöskään voi tutustua lumoutumatta siihen verrattomaan tarkkuuteen, jolla se nykyisin kuvaa mitä moninlaisimpia luonnonilmiöitä, ja tulematta ehdottoman vakuuttuneeksi siitä, että sen perusajatuksiin kätkeytyy syvällisen totuuden siemen.

Havainto ja teoria

Luonnon objektien ominaisuuksissa ja sen tapahtumissa ilmenevät säännönmukaisuudet voidaan selvittää vain mittaamalla, toisin sanoen järjestämällä tilanteita, joissa olosuhteet ja tarkasteltavien objektien ominaisuudet ovat sopivasti määritellyin mitoin mitattavissa ja joissa tutkittavan ilmiön karakteristisia suureita voidaan tarkkailla. Vain kun ilmiön koko tapahtuma alusta loppuun on näin alistettu täyden kontrollin alaiseksi, on mahdollista saada selville sen lainalaisuudet eli mitattavien suureiden riippuvuus toinen toisistaan. Tämä on nykyään itsestään selvää, mutta näemme historiasta, ettei kvantitatiivisen mittauksen merkitystä tieteellisenä koikeena ole aina tajuttu. Galilei oli ensimmäisiä luonnontutkijoita, jotka sen selvästi oivalsivat. Hänen heittoliikettä koskevat mittauksensa ovat sen tähden historian merkkitapaus, nykyaikaisen fysiikan alku.

Kokeiden tulokset voidaan hyväksyä tieteellisiksi tuloksiksi vain, jos kuka tahansa, joka suorittaa kokeen edellyttämät toimenpiteet, päätyy samoihin tuloksiin. Tämä on luonnontieteessä ainoa mahdollinen ajatustapa, ja se merkitsee, ettei tieteellinen totuus koskaan ole enempää eikä vähempää kuin mittaamalla voidaan todeta. Ainoa mahdollinen tieteellisesti varman tuloksen muoto on tämä: jos koeolosuhteet kiinnitetään siten, että nämä mitattavat suureet saavat ne ja ne arvot, todetaan ilmiö, jossa nuo mitattavat suureet saavat nämä ja nämä arvot.

Vain kokeelliset numerosarjat ovat siis täysin kiistatonta luonnontieteellistä totuutta. Kuitenkin ne ovat oikeastaan vasta fysiikan lähtökohta. Tässä juuri näemme luonnontieteen läheisen kytkeytymisen maailmankuvan etsintään. Pelkät numerot eivät tyydytä ymmärrystä edes tieteessä. Ne vain esittävät täsmällisemmässä muodossa sen, mikä halutaan ymmärtää. Samalla ne osoittavat, onko ymmärretty oi-

kein. Ne ovat sen ehdoton ja ainoa kontrolli. Tämän vuoksi fysiikan ajatuksellinen, ymmärrykseen vetoava puoli, sen teoria, tajutaan luonnostaan keskeisimmäksi. Kokeellisen tutkimuksen ja teorian suhde on pienoiskuva yleisestä havainnon ja maailmankuvan välisestä suhteesta. Teoria on fysiikan maailmankuva. Siihen sisältyy kaikki fysikaalinen ymmärtäminen, ja kuten maailmankuvassa aina perustuu se tässäkin pohjimmiltaan inhimilliseen ajatteluun.

Fysikaalinen teoria pohjautuu aina joihinkin yleisiin periaatteisiin, joiden oletetaan olevan voimassa. Nämä sen peruspostulaatit ovat tai niistä on välttämättömänä matemaattisena seurauksena loogisia yhteyksiä joidenkin fysikaalisten suureiden välillä. Teoria ennustaa näin joukon koetuloksia mitattavien suureiden matemaattisesti ilmaistuina riippuvuussuhteina. Teoria on laajempi tai suppeampi, parempi tai huonompi aina sen mukaan, kuinka tarkasti ja kuinka monien erilaisten ilmiöiden osalta sen ennusteet pitävät paikkansa. Jokaisella teorialla on omat rajansa, joiden ulkopuolella teoria johtaa enemmän tai vähemmän virheellisiin tuloksiin.

Teorian kieli on matematiikka, ja kokeellinen tutkimus lähestyy teoriaa pyrkimällä esittämään numerosarjansa yhtenäisessä muodossa matemaattisina yhtälöinä. Usein se on voinut tällä tavoin antaa tärkeän sysäyksen uusien ajatusten kehittämiseen. Oikeastaan fysiikan tärkeät säilymislait, invarianssiperiaatteet, ovat tällaisia laajaan havaintoaineistoon perustuvia yksinkertaisia empiirisiä kaavoja. Juuri sen tähden niillä on teoreettisessakin ajattelussa niin keskeinen asema.

Usein on pyritty antamaan teorian postulaateille eräänlainen ajatusvälttämättömyyden leima: näin on oltava, koska toisin on mahdotonta ajatella olevan. Tällainen ajatustapa fysiikassa on hyvin lähellä paradoksia. Toisaalta tunnustetaan luonnontieteelliseksi totuudeksi vain se, mikä on mitattavissa, mutta toisaalta ollaan taipuvaiset pitämään joitakin ideoita, siis inhimillisen ajattelun tuotteita, syvempänä totuutena. Ankara luonnontieteellinen ajattelutapa johtaa pikemminkin siihen teorian merkitystä vähättelevään käsitykseen, että teoria on parhaimmillaankin pelkästään matemaattinen muistisääntö, kokeellisen fysiikan kaoottisen numeromäärän – ainoan luonnontieteellisen totuuden – yleiskirjanpito. Fysiikan historiassa on kuitenkin useita tapauksia, jotka suurenmoisella tavalla todistavat, että teorialla on myös oma itsenäinen arvonsa. Korostetuimmin tämä on ilmennyt silloin, kun on kokeellisesti todettu teorian ennustamia ennen tuntemattomia ilmiöitä. Esimerkiksi monien nykyisin tunnettujen alkeishiukkasten olemassaolo ja ominaisuudet on teoreettisesti ennustettu ennen niiden löytämistä. Positroni¹, pioni² ja neutriino³ ovat tunnetuimmat tapaukset mutta eivät suinkaan ainoat.

Kehityksen käyttövoimana ovat aina olleet selittämättömät mittaustulokset, havainnot joita ei ole kyetty ymmärtämään tunnettujen teoreettisten periaatteiden

¹ Diracin 1928 esittämä elektroniteoria edellytti, että on myös antielektrooni eli positroni, jolla on elektronille vastakkaiset ominaisuudet, muun muassa positiivinen varaus. Elektronin ja positronin piti erityisesti voida yhtyä siten, että jäljelle jäisi vain sähkömagneettista säteilyä. Täsmälleen tällaisen hiukkasen löysi Anderson 1932.

² Vrt. s. 51.

³ Niin sanottu beeta-hajoaminen, jossa atomytimen yksi neutroni muuttuu protoniksi lähettäen elektronin, osoittautui erikoislaatuisiksi ilmiöksi. Näytti siltä, että täysin loukkaamattomina pidetyt suuret invarianssiperiaatteet, energian, impulssin ja impulssimomentin säilymislait, eivät pitäneet siinä paikkaansa. Vuonna 1933 Pauli ehdotti, että kaikki merkillisyydet voitaisiin selittää ja pelastaa säilymislait, jos oletettaisiin tuntemattoman hiukkasen, neutriinin, samanaikainen syntyminen ilmiössä. Vasta 1956 Reines ja Cowan onnistuivat osoittamaan tämän massattoman ja varauksettoman hiukkasen olemassaolon kokeellisesti sen aiheuttaman ydinreaktion avulla.

nojalla. Ne yllyttävät tutkijoita yhä uusiin ponnistuksiin, jotta voitaisiin löytää aukkoja vallitsevasta ajattelusta ja kehittää uusia teoreettisia ideoita. Ne ovat pakottaneet kerran toisensa jälkeen analysoimaan teorian perusteita, selvittämään missä kohden sen periaatteissa ja käsitemaailmassa piilee metafyyysisiä aineksia tai ajatusvälttämättömyyksiä, joista luopumalla teorian kannalta käsittämättömät ilmiöt voitaisiin selittää. Jokainen edistysaskel perusajatusten kehittämisessä edellyttää uutta oivallusta, henkistä luomistapahtumaa, jonka olemukseen liittyy samalla myös jotakin selittämätöntä. Pakotteena fysiikassa on kuitenkin aina kokeellinen tutkimus, eikä uusia ajatuksia ole mahdollista ymmärtää oikein, ellei nähdä niiden kokeellista perustaa. Yhä uudelleen on jouduttu kertaamaan samaa läksyä: on yhdentekevää, millainen luonnon meidän mielestämme pitäisi olla, havainto yksin ratkaisee millainen se on.

Liike ja voima

Nykyinen fysiikka on pitkän kehityksen tulosta. Sen kokeellinen tietämys, teoreettiseen ajatteluun perustuva ymmärtämys, sen sekä kokeelliset että teoreettiset työmenetelmät ja yleensä koko fysikaalinen ajattelutapa, on vuosisatojen kuluessa vähitellen muodostunut. Tähän on tarvittu suunnaton määrä työtä, taistelua toisten ja omia ennakkoluuloja vastaan ja yhä toistuvista erehdyksistä huolimatta lannistumatonta yritystä eteenpäin. Yhä edelleenkin olemme erittäin dynaamisen kehityksen pyörteissä. Ymmärtääksemme kehityksen tämänhetkistä vaihetta meidän on tunnettava sen tausta. Nykyisen fysiikan merkitystä maailmankuvalle ja -katsomukselle on mahdotonta arvostella oikein, ellei tiedä niitä syitä, jotka ovat muovanneet fysiikan nykyiselleen.

Fysiikkaan kaikkein laajimmin ja syvimmin vaikuttaneet oivallukset keskittyvät kahteen suureen kriisikauteen. Edellinen näistä oli Galilein aika. Silloin alettiin nähdä, mikä arvo kvantitatiivisella kokeellisella tutkimuksella on ainoana tiedonlähteenä ja mikä merkitys sen tulosten matemaattisella esitystavalla johdattajana ilmiöiden olemuksen syvempään ymmärtämiseen. Jälkimmäinen kriisi oli tämän vuosisadan alussa. Silloin jouduttiin ensimmäisen kerran vakavasti toteamaan, että inhimillinen ajattelu ja sen käyttämät käsitteet kytkeytyivät tiiviisti konkreettiseen havaintomaailmaan ja sopivat siksi vain ihmisen omaa mittakaavaa olevien ilmiöiden tarkasteluun. Kriisien välinen aika oli fysiikan klassillinen kausi. Se alkoi lähes täydellisestä tietämättömyydestä, mutta sen rakentama klassillinen fysiikka muodosti lopulta hyvin ehjän kokonaisuuden, jota alettiin pitää suorastaan valmiina fysiikan maailmankuvana. Varsin yleisesti uskottiin, että tämän rakennelman perusideat olivat ajatusvälttämättömyyden pakosta ainoat mahdolliset.

Kehitys alkoi kappaleiden liikkeen tutkimisesta. Liike lienee fysikaalisista ilmiöistä yleisin ja alkeellisin, joten on luonnollista, että sen hallitseminen on ollut fysiikan ensimmäisiä tavoitteita. Sitä luonnehtivat yksinkertaisimmat mitattavat perussuureet, paikka ja aika, ja kävi ilmi, että siihen vaikuttavia ulkoisia tekijöitä oli käytännöllistä ilmentää yhdellä yleisellä voiman käsitteellä. Peruskysymys siis oli: millainen on kappaleen liike eli sen paikan riippuvuus ajasta, kun siihen vaikuttaa tunnettu voima? Galilei jo pääsi selville siitä, ettei voimaa tarvita liikkeen jatkamiseen, kuten aikaisemmin oli yleisesti selitetty, mutta sen sijaan sekä liikkeelle saamiseen että pysäyttämiseen. Kuitenkin vasta Newton varsinaisesti ratkaisi tämän

kysymyksen 1687 julkaisemissaan tutkimuksissa. Hänen esittämänsä ratkaisu oli äärimmäisen yksinkertainen, ja se jäikin 'klassillisessa fysiikassa lopulliseksi.

Niin sanotun Newtonin toisen lain, mekaniikan peruslain, mukaan vaikuttava voima F antaa kappaleelle omaan suuntaansa tietyn kiihtyvyyden a , joka riippuu ainoastaan kappaleen massasta m . Täsmällisemmin voidaan näiden suureiden välinen yhteys kirjoittaa: $F = ma$. Tällä yksinkertaisella yhtälöllä on ollut valtava sekä fysikaalinen että maailmankatsomuksellinen merkitys. Sen avulla voidaan täydellisesti laskea kappaleen liike ajassa miten kauas hyvänsä eteen- tai taaksepäin, jos tunnetaan kappaleen liiketila jonakin hetkenä ja kappaleeseen vaikuttavat voimat. Tämä yhtälö koskee oikeastaan vain pistemäistä massaa. Mutta pelkästään matemaattisin tarkasteluin siitä voidaan johtaa minkä tahansa massapistejoukon, esimerkiksi kiinteän kappaleen, liikelait, jos siihen kuuluvien massapisteidien keskinäiset voimavaikutukset tunnetaan riittävän hyvin. Klassillisen mekaniikan kehitys onkin tämän jälkeen etupäässä vain Newtonin lakien seurausten laskemista. Kaikki niistä johdetut lait ovat saman luonteisia: jos tunnetaan tarkasteltavan systeemin liiketila jonakin hetkenä ja vaikuttavat voimat, voidaan sen tila yksityiskohtaisesti laskea minä muuna hetkenä hyvänsä. Tämä ominaisuus on tehnyt Newtonin laeista deterministisen maailmankuvan lähtökohdan ja symbolin. Luonnon kuvaamiseen käytetyn matemaattisen koneiston ominaisuudet käsitetään tämän maailmankuvan mukaisessa ajattelussa luonnon omiksi laeiksi, ja niin syntyy kuva maailmasta koneena, jonka käynnin jokainen vaihe pienimpiä yksityiskohtia myöten on edellisen vaiheen ehdoton seuraus ja jossa siten yhden hetken tilanne määrää kaiken iankaikkisesta iankaikkiseen. Koko klassillisen fysiikan kehitys on oikeastaan tämän kuvan rakentamista. Pelkkä Newtonin laki ei sellaiseen riitä, koska on paljon sen piiriin kuulumattomia ilmiöitä, mutta se on tämän kuvan ensimmäinen peruskivi.

Koska voimien tunteminen on liikkeiden hallitsemisen ehto, syntyy seuraavaksi luonnollisesti kysymys siitä, millaisia voimia luonnossa vaikuttaa. Tässäkin Newton otti tärkeän askelen. Hän osoitti, että planeettojen havaittu liike edellytti, että niihin vaikutti aurinkoon suunnattu voima, joka oli kääntäen verrannollinen auringosta lasketun etäisyyden neliöön. Tämän tuloksen valtavana yleistyksenä hän esitti yleisen vetovoimalain eli gravitaatiolain, jonka mukaan mitkä tahansa kaksi kappaletta vetävät toisiaan voimalla $F = \gamma m M / r^2$, missä m ja M ovat kappaleiden massat, r niiden välinen etäisyys ja γ yleinen luonnonvakio, ns. gravitaatiovakio.

Tässä oltiin ensi kerran tekemisissä kappaleiden välisen kaukovaikutuksen kanssa, jonka ymmärtäminen on tuottanut ajattelijoille arvaamattomia vaikeuksia. Klassillisen fysiikan omaksuman ajatustavan mukaan massa luo ympärilleen painovoimakentän, eräänlaisen avaruuden tilan, joka puolestaan aiheuttaa voimavaikutuksen toiseen kappaleeseen. Olipa tämänkaltaisen mekanismin ajatuksellinen hyväksyminen helppoa tai vaikeaa, se tosiasia ei muutu, että gravitaatiolaki antoi oikeita ennusteita ilmiöistä, joita sen katsottiin hallitsevan. Tähtitieteessä se merkitsi suorastaan vallankumousta. Kun gravitaatiovakio saatiin määräytyksi,⁴ oli tie avoinna maan, kuun, auringon ja yleensä kaikkien sellaisten taivaankappaleiden massojen määrittämiseen, joiden keskinäiset etäisyydet ja liikkeet voitiin havaita. Mekaniikan peruslakia soveltamalla voitiin sitten etukäteen laskea myös näiden kappaleiden liikkeet erittäin tarkasti. Suurten planeettojen, Neptunuksen ja Pluton,

⁴ Sen määräsi ensimmäiseksi Cavendish 1798 mittaamalla lyijypallojen välisen vetovoiman suuruutta. Hän kutsui koettaan maapallon punnitukseksi.

löytyminen muiden planeettojen ennustettujen liikkeiden häiriöistä laskemalla on merkinnyt klassilliselle mekaniikalle suurta voittoa. Niin pitkälle kuin tähtitiede onkin päässyt maailmankaikkeuden tutkimisessa, ei ole ilmennyt aihetta epäillä Newtonin lakien pätevyyttä. Ne näyttävät hallitsevan planeettakuntien, aurinkojärjestelmien, linnunratojen ja linnunratakuntien liikkeitä täydellisesti aina miljardien valovuosien etäisyyksiin asti.

Maanpäällisen mittakaavan ilmiöissä ei kappaleiden välisellä gravitaatiovuorovaikutuksella heikkoutensa takia ole käytännöllistä merkitystä. Kappaleiden ollessa toistensa ja muun ympäröivän aineen kanssa välittömässä kosketuksessa on niihin vaikuttamassa monin verroin vahvempia voimia, jotka näyttävät hyvin monimutkaisilta ja vaikeasti analysoitavilta. Kuitenkin ne vaikuttavat tarkalleen Newtonin lakien mukaisesti.

Klassillinen mekaniikka toi fysiikkaan myös ensimmäiset tärkeät säilymislait. Jo sen lähtökohtana on massan säilyminen. Jokaisen mekaanisen systeemin ajateltiin muodostuvan osista, joilla oli aivan tietty muuttumaton massa. Sen perusyhtälöiden yksinkertaisina seurauksina opittiin tuntemaan energian, impulssin ja impulssimomentin⁵ säilyminen. Ellei ulkopuolisia voimia ole vaikuttamassa, nämä suureet pysyvät muuttumattomina tietyin systeemin sisäisiä voimia koskevin yleisin edellytyksin. Erityisesti massa ja energia liittyvät läheisesti melkein kaikkiin fysiikan ilmiöihin. Klassillisen kauden tärkeimpiä saavutuksia on, että opittiin näkemään energia eri muodoissaan, mm. lämpöenergiana, säteilyenergiana ja kemiallisena energiana, ja todettiin energian säilyminen luonnon yleiseksi invarianssiperiaatteeksi. Suuren pysyvyytensä vuoksi nämä suureet ovat muodostuneet fysiikassa hyvin keskeisiksi peruskäsitteiksi, ja niiden olemuksen selvittely eri teoriain valossa on fysiikan mielenkiintoisimpia teemoja.

Mekaanisten ilmiöiden suhteen Newtonin teoria oli kiistattomasti menestyksellinen. Kesti kauan, ennen kuin fysiikan muilla aloilla päästiin vähääkään vastaaviin saavutuksiin. Oli paljon suuria ongelmia, kuten lämpö, valo, kemialliset ilmiöt, sähkö, magnetismi, materian ominaisuudet, sen olomuodot ja niiden muuttuminen toisikseen. Niiden ratkaiseminen oli yleisen maailmankuvankin kannalta tärkeää, ja niitä tutkittiin paljon sekä kokeellisesti että teoreettisesti. Siksi on ehkä yllättävää, että seuraava ratkaiseva edistysaskel klassillisen maailmankuvan muodostamisessa johti sittenkin takaisin kappaleiden välisiä vuorovaikutuksia koskevaan kysymykseen.

Sähköisten ja magneettisten ilmiöiden tutkimus huipentui Maxwellin 1865 esittämään yleiseen teoriaan, sähködynamiikkaan, josta tuli klassillisen fysiikan toinen kulmakivi. Lähtökohtana oli varaus, sähkömäärä joka massan tavoin oli invariantti, syntymätön ja häviämätön suure. Samoin kuin kappaleen massa luo

⁵ Kaikki kolme suureta ilmaisevat eri tavoin voiman vaikutusta systeemiin. Systeemin energianlisäys on sama kuin siihen vaikuttavien voimien tekemä työ. Se ilmenee joko liike-energiana tai potentiaalienergiana, eräänlaisena systeemin sisäisiin voimakenttiin perustuvana latautuneisuutena, joka sekun purkautuessaan voi muuttua liike-energiaksi. Impulssi on eräänlainen etenemisliikkeen määrän mitta ja impulssimomentti vastaavasti pyörimisen mitta. Puhdasoppisen oppituntiterminologian mukaan tässä pitäisi puhua liikemäärästä, joka on kappaleen massa \times nopeus, tai kokonaisliikemäärästä, joka on systeemin osasten liike määrien summa. Newtonin laeista seuraa, että tämä muuttuu voiman vaikutuksesta määrällä, joka on yhtä suuri kuin voiman antama impulssi eli voima \times vaikutusaika. Vastavasti olisi pyörimisen yhteydessä puhuttava liikemäärän momentista ja voiman (vääntö)momentin antamasta impulssista, jotka ovat eri käsitteitä. Käytännössä puhutaan kuitenkin vain impulssista ja impulssimomentista.

ympärilleen gravitaatiokentän, jonka toinen massa tuntee voimana, kappaleen varaus aiheuttaa sähkömagneettisen kentän, jonka toinen varattu kappale tuntee. Tämä vuorovaikutus on gravitaatiota hyvin paljon voimakkaampi ja sen ilmenemis- muodot ovat jo siksikin edellistä paljon rikkaammat. Maxwellin yhtälöt kuvasivat tämän kentän ominaisuuksia matemaattisessa muodossa, ja ne selittivät kvantitatiivisesti yleensä kaikki sellaiset tunnetut ilmiöt, joita niiden voitiin katsoa kuvaavan.

Newtonin ja Maxwellin teoriat muodostivat yhdessä oleellisimman osan fysiikan klassillista maailmankuvaa. Jokaisessa systeemissä, johon kuului joukko massoja ja varauksia, tunnettiin nyt kaikki vaikuttavat voimat. Siis ainakin periaatteessa ne voitiin täysin hallita joukolla Newtonin ja Maxwellin yhtälöitä. Kun atomiteorian oikeutus alkoi käydä ilmeiseksi, tuli klassillisen fysiikan perusteella muodostettu käsitys maailmankaikkeudesta yllättävän lähelle tällaista newtonilais-maxwellilaista massa-varaus -konetta.

Atomiteoria, joka oli esitetty jo antiikin filosofiassa, tuli luonnontieteessä ajan-kohtaiseksi ensin kemiallisten ilmiöiden yhteydessä. Kaikki kemialliset reaktiot oli helppo selittää, jos ajateltiin, että kullakin alkuaineella oli oma muuttumaton atominsa. Fysiikan alalla atomiteorian ensimmäinen suuri voitto oli Maxwellin ja Boltzmannin statistinen mekaniikka, jossa voitiin aineen atomirakenteesta lähtien laskea tilastollisin menetelmin lukuisia aineen tärkeitä ominaisuuksia, edellyttäen että atomien liikkeet noudattivat Newtonin mekaniikkaa. Tämä oli pitkä askel maailmankuvan yhtenäistymisen tiellä. Palauttihan se suuren joukon ilmiöitä jo kauan tunnettuihin mekaniikan lakeihin. Se muun muassa ratkaisi lopullisesti lämmön olemuksen atomien ja molekyylien liikkeenä ja selitti samalta pohjalta myös aineen eri olomuodot ja niiden muuttumisen toisikseen.

Tässä yhteydessä ei atomien välisten voimien alkuperästä vielä ollut selvyyttä. Kuitenkin se olisi ollut välttämätöntä, jotta olisi voitu tarkalleen kirjoittaa atomeista muodostuvan systeemin liikeyhtälöt. Jo ensimmäisten atomien rakennetta koskevien tutkimusten yhteydessä kävi kuitenkin ilmi, että nämä voimat ovat alkuperältään sähkömagneettiset ja johtuvat atomien rakenneosasten varauksesta. Atomien yhtyminen ja eroaminen ja siis luonnon kemian koko suunnaton runsaus näytti näin palautuvan samoihin hyvin hallittuihin perusilmiöihin.

Viimeinenkin klassillisen kauden suurista problemeista, valo, tuli kytketyksi samaan yhtenäiseen kuvaan, kun se osoitettiin sähkömagneettisen kentän aaltoliik-keeksi. Sitäkin siis hallitsivat Maxwellin yhtälöt. Atomitutkimus osoitti pian, että se syntyy atomien varattujen rakenneosasten välisen kentän muutoksista.

Klassillisen fysiikan suuri maailmannäkemyks oli näiden havaintojen jälkeen pääpiirteissään valmis. Sen mukaan oli vain perushiukkasia sekä niiden massoista ja varauksista johtuvia gravitaatiokenttiä tai sähkömagneettisia kenttiä. Nämä kentät aiheuttivat kaikki fysikaalisessa luonnossa esiintyvät voimat ja voimat taas kai-ken liikkeen. Kun kenttien ominaisuudet hallittiin ja liikettä hallitsevat lait tunnettiin, näyttivät kaikki ilmiöt olevan johdettavissa. Koko luomakunnan rakenne tun- tui periaatteessa täysin selvältä. Jäljellä oli vain yksityiskohtien laskemista Newtonin ja Maxwellin yhtälöiden avulla. Kuva oli niin yksinkertainen ja sisäisesti täy- dellinen, että se lumosi myös monet etevimmistä ajatteliijoista. Ei ollut lainkaan ihmeellistä, että siitä oli vaikea luopua vakuuttavienkin todisteiden edessä. Oikeas- taan on melkein pä traagista todeta, että juuri samat tutkimukset, jotka lopullisesti täydensivät tämän kuvan, samalla kiistattomasti paljastivat sen epätäydellisyyden.

Suhteellinen ja absoluuttinen

»Kaikki on suhteellista» on ehkä jo vähän kulunut elämäkatsomuksellinen iskulause. Se ilmaisee kuitenkin varsin ytimekkäästi nykyajan ihmisen yleisen asennoitumisen: ei tunnusteta mitään absoluuttisia arvoja, ei ole mitään ehdotonta totuutta, kaikki normijärjestelmät ovat yhtä hyviä, kaikki käsitykset ja mielipiteet ovat yhtä oikeutettuja. Näihin seikkoihin olisi tuskin aihetta puuttua tässä yhteydessä, ellei edellä olevaan sanontaan yleisessä tajunnassa liitettäisi tiettyä fysikaalista taustaa. Epämääräisenä mielikuvana häilyy taka-alalla suhteellisuusteoria ja ajatus, että Einstein on siinä antanut tieteellisen perustelun mille tahansa elämän juurettomuudelle.

Kaiken suhteellisuus on alun perin aivan vieras ajatus luonnontieteelle, joka näkee luonnon tutkimisen arvoisena olemassa olevana todellisuutena. Luonnon objektit ja niiden ominaisuudet ovat absoluuttisia. Niistä tehdyt havainnot voivat olla suhteellisia. Suhteellisuus merkitsee aina jossakin mielessä eri havaintojen tekemien subjektiivisten havaintojen erilaisuutta. Fysiikassa ja nimenomaan suhteellisuusteoriassa pyritään löytämään absoluuttisia suureita, joille jokainen havaintosija saisi mitatessaan saman arvon. Niiden ymmärretään kuvaavan luonnon ominta todellisuutta.

Kohtaamme jokapäiväisessä elämässä paljonkin suhteellisia käsitteitä. Kahden henkilön havainnot samasta kohteesta ovat erilaiset. Ihminen on erinäköinen edestä ja takaa. Kuitenkin näkemämme henkilö merkitsee meille sinänsä absoluuttista oliota, ja tajuamme ilman selityksiäkin, miksi näkemyksemme hänestä ovat erilaisia. Ne ovat suhteellisia. Ne riippuvat jollakin tavoin asemastamme häneen. Voimme kyllä – ainakin jossain määrin – kuvata häntä myös absoluuttisin mitoin. Esimerkiksi koko, paino, ikä ja silmien väri ovat tällaisia havaintosijasta riippumattomia suureita. Fysiikassa tarvitaan myös paljon suhteellisia käsitteitä. Niitä on mahdotonta välttää. Suhteellisten havaintojen avulla yritetään muodostaa kuvaa absoluuttisista suureista ja selittää sitten, miten ja miksi saadaan erilaisia subjektiivisia havaintoja. On selvää, että etäisyys, esimerkiksi matka Roomaan, on suhteellinen. Se riippuu havaintosijan paikasta. Samoin käsitteet »ylös» ja »alas» ovat suhteellisia, koska ne merkitsevät toisistaan poikkeavia suuntia eri puolilla maapalloa. Halutessamme puhua paikoista ja suunnista kiinnitämme siksi aina jonkin nollapisteen, origon, ja liitämme siihen jotkin perussuunnat, akseliston. Valitun koordinaatiston suhteen paikat ja suunnat saavat absoluuttisen merkityksen ja tulevat käyttökelpoisiksi fysiikassa. Samasta syystä kiinnitämme nollahetken puhuessamme ajasta.

On selvää, että voimme ilmaista paikan, suunnan ja ajan vain suhteessa tiettyyn koordinaatistoon ja nollahetkeen. Liikkeen tutkiminen edellyttää paikan ja ajan määräystä, joten tarvitsemme siinä ainakin lähtökohdaksi jonkin akseliston. Mitattu nopeus, kiihtyvyys ja muut liikettä kuvaavat suureet riippuvat tällöin valitun koordinaatiston omasta liikkeestä, joten saamme määrät yksi vain suhteellisen liikkeen. Esimerkiksi suhteellisen nopeuden käsite on täysin jokapäiväinen; niinpä auton nopeus on toisen auton suhteen erilainen kuin jalankulkijan suhteen. Tilanne on epätydyttävä, koska koordinaatiston oma liike ilmeisesti ratkaisee sen suhteen mitattujen liikesuureiden arvot. On vaikeata ajatella, että näin saataisiin mitään tietoa liikkeestä itsestään luonnon ilmiönä, elleimme pysty valitsemaan varmasti paikoillaan olevaa koordinaatistoa.

Ennen oli maa maailmankuvassamme tällainen kiinteä lähtökohta, Johon vertaamalla kaikille paikan, suunnan, nopeuden ynnä muun määryyksille saatettiin antaa absoluuttinen merkitys. Klassillisen fysiikan aikakausi riisti kuitenkin maalta tämän erikoisaseman. »Kiinteä akselisto» osoittautui hyvin monipuolisesti liikkuvaksi, pikku taivaankappaleeksi, joka on vain yksi monista samanarvoisista. Kun vielä keskuskappaleemme, aurinko, kiertää linnunradan keskustaa ja koko tähti-järjestelmämme liikkuu muihin järjestelmiin nähden, olemme täysin vailla kiintopistettä.

Jäljelle jää periaatteellinen kysymys: voidaanko millään tavalla todeta, onko jokin tietty kappale liikkeessä? Siis: onko olemassa absoluuttista liikettä? Liikkeen suhteellisuus esitetään usein itsestään selvänä ajatusvälttämättömyytenä. Se voidaan tietenkin ottaa postulaatiksi, mutta kun sitten tarkastellaan, mitä se loppuun asti ajateltuna merkitsee, on varsin vaikeata yhtyä käsitykseen sen itsestäänselvydestä. Periaatteen oikeus tai vääräys riippuu kuitenkin vain siitä, ovatko havaitut luonnonilmiöt siitä seuraavien ennusteiden mukaiset vai eivätkö ne ole. Jos tunnettaisiin yksikin ilmiö, joka tapahtuu liikkeessä toisin kuin levossa, voitaisiin sitä heti käyttää liiketilän toteamiseen. Olisi siis mahdollista löytää myös absoluuttisessa levossa oleva systeemi ja siihen vertaamalla määrätä minkä tahansa kappaleen absoluuttinen nopeus. Ellei tällaista ilmiötä ole, on mieleltöntä puhua muusta kuin suhteellisesta nopeudesta, koska fysiikassa suure ei ole olemassa, jos sitä on mahdoton havaita.

Eräänä mekaniikan peruslakeihin liittyvänä olennaisena piirteenä Newton mainitsee suhteellisuusperiaatteen: kappaleiden liikkeet ovat riippumattomat siitä, onko se tila, jossa kappaleet ovat ja jossa niiden liikettä tarkastellaan, itse tasaisessa suoraviivaisessa etenemisliikkeessä vai levossa. Tämän yksinkertaisen tosiasian lienee jokainen joutunut jossakin määrin kokemaan esimerkiksi ollessaan tasaisesti liikkuvassa ajoneuvossa. Ajoneuvon liikettä ei huomaa mistään sen sisällä tapahtuvasta, vaan sen toteamiseksi on tarkasteltava ympäristöä. Absoluuttista nopeutta ei ilmeisesti voida määrätä ainakaan mekaanisia systeemejä tarkastelemalla.

Klassilliselle fysiikalle tämä kysymys muodostui erityisen polttavaksi siitä syystä, että Maxwellin yhtälöt saavat liikkuvassa systeemissä toisen muodon kuin paikallaan olevassa. Klassillisen fysiikan mukaan absoluuttisen nopeuden määrittämisen siis olisikin pitänyt olla mahdollista sähkömagneettisia ilmiöitä hyväksi käyttämällä. Yhtenä seurauksena näistä yhtälöistä on valon eteneminen kaikkiin suuntiin nopeudella $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s valon lähteen nopeudesta riippumatta. Tilanne käsitettiin analogiseksi äänen etenemiselle, jonka nopeus etenemisväliaineen suhteen on aina määrätty ja riippumaton äänen lähteen liikkeestä. Tähän rinnastaen puhuttiinkin valon etenemisen väliaineesta, maailmaneetteristä. Jos valon etenemistä voitaisiin tarkastella eetterin suhteen liikkuvasta koordinaatistosta käsin, pitäisi havaitun nopeuden riippua systeemin liikkeestä. Jos pakenemme valoa nopeudella v , sen tulisi saavuttaa meitä hitaammin eli nopeudella $c - v$, jos taas riennämme sitä vastaan, olisi sen nopeus meihin nähden $c + v$. Tietysti, me sanomme. Mutta havaittu totuus on toisenlainen! Mittaukset osoittavat täysin kiistattomasti, että valon nopeus mittaajan suhteen on aina sama, c .

Maxwellin yhtälöiden ehdottama mahdollisuus absoluuttisen nopeuden mittaamiseksi osoittautui siis erheelliseksi. Niiden riippuvuus systeemin nopeudesta ei näin ollutkaan luonnonmukainen. Suhteellisuusperiaate piti sittenkin paikkansa myös sähkömagneettisiin ilmiöihin nähden.

Saadun tuloksen mukaan valo pakenee meitä aina meihin nähden samalla nopeudella c , vaikka ajaisimme sitä takaa miten nopeasti hyvänsä. Jos joku sivullinen tarkastelee tätä ajojahtia, hänkin luonnollisesti toteaa, että valo karkaa. Hänenkin suhteensa valo liikkuu kuitenkin vain nopeudella c , joten meidän nopeutemme hänen mittaamanaan on varmasti sitä pienempi. Meidän tai ylimalkaan minkään kappaleen ei siis ilmeisestikään ole mahdollista saavuttaa valon nopeutta, puhumattakaan sen ylittämistä, mitattiinpa liikettämme mistä systeemistä käsin tahansa. Valon nopeus on siten kappaleiden liikenopeuksien ehdoton ja saavuttamaton yläraja. Tämä tuntuu sotivan tervettä järkeä vastaan ja se on ristiriidassa myös klassillisen fysiikan ajatustapojen kanssa, mutta koska se on suoranainen seuraus havaintotuloksista, se on pakko hyväksyä fysikaalisena totuutena. Jos käsityskykymme ei pysty sitä hyväksymään, on vika meissä.

Nopeus on fysiikan yksinkertaisimpia suureita. Sen mittaaminen edellyttää vain matkan ja ajan mittausta. Valon nopeutta koskeva tulos osoittaa, että klassillisessa fysiikassa näihin peruskäsitteisiin liittyy joitakin luonnolle vieraita piirteitä. Einsteinin suppeampi suhteellisuusteoria lähtee liikkeelle lähinnä ajan käsitteen tarkistuksesta. Tämä käsite analysoidaan siinä uudelleen pitäytymällä mahdollisimman tarkasti fysikaaliseen ajatustapaan, jonka mukaan vain mitattava suure kelpaa fysikaaliseksi käsitteeksi. Keskeiseksi kysymykseksi osoittautuu tällöin, miten on mahdollista suorittaa ajanmittauksen yhdenmukaistus eli eri paikoissa olevien ja eri nopeuksilla liikkuvien kellojen vertailu. Tähän tarvitaan signaali, jonka avulla kellojen lukemat välitetään. Jos käytettävissä olisi mielivaltaisen nopeita signaaleja, voitaisiin tarkistus suorittaa miten tarkasti hyvänsä. Mutta nyt valo onkin nopein mahdollinen signaali, ja siitä aiheutuu mielenkiintoisia rajoituksia. Jos valon nopeus tunnetaan, on mahdollista määrätä, kuinka pitkä aika signaalilta kuluu kellosta toiseen. Näin voidaan saattaa kaikkien toistensa suhteen liikkumattomien systeemien ajanlaskut tarkalleen yhtäpitäviksi. Sen sijaan ei ole mahdollista yhdenmukaistaa toistensa suhteen liikkuvien systeemien aikoja siten, että eri systeemien kellot toisensa sivuuttaessaan aina näyttäisivät samaa aikaa. Kahdesta eri paikoissa sattuvasta tapahtumasta ei ole mahdollista aina sanoa edes, kumpi oli aikaisempi. Eri nopeuksilla liikkuvien havaitsijain mielestä ne saattavat tapahtua eri järjestyksessä. Klassillisen fysiikan pohjana oleva käsitys ajasta kaikkialla maailmankaikkeudessa toisiaan seuraavien samanaikaisten nyt-hetkien jatkuvana virtana on siis ollut pakko hylätä, ei inhimillisen mielikuvituksen oikusta vaan havaintojen pakosta. Aika on suhteellinen käsite.

Suppeampi suhteellisuusteoria sisältää kaiken sen, mikä matemaattisena välttämättömyytenä seuraa tästä aika-käsitteen tarkistuksesta ja valon nopeuden ylittämättömyydestä.⁶ Sen ennusteisiin kuuluu koko joukko merkillisen tuntuksia ilmiöitä, joista paljon puhutaan yleistajuisessa kirjallisuudessa. Niinpä esimerkiksi kahden kappaleen välimatka on sitä lyhempi mitä nopeammin havaitsija liikkuu niitä yhdistävän janan suuntaan. Samoin on jonkin systeemin samassa pisteessä sattuvien tapausten väliaika tämän suhteen liikkuvassa systeemissä mitattuna pitempi. Tämä merkitsee muun muassa sitä, että liikkeellä oleva henkilö vanhenee vähemmän kuin hänen paikoillaan olevat ikätoverinsa. Nopeasti liikkuvien alkeishiukkasten havaitut elinajat ovat täydelleen vahvistaneet tämän ennusteen. Suhteelli-

⁶ Lisäksi tarvitaan tosin eräitä matemaattisia oletuksia, jotka lähinnä merkitsevät sitä, että valitaan yksinkertaisin mahdollinen teoria.

suusteorian mukaan myös kappaleen massa kasvaa nopeuden lisääntyessä. Massa nimittäin ilmaisee, kuinka vaikeaa kappaleen nopeuden muuttaminen on. Koska valon nopeuden saavuttaminen on mahdotonta, täytyy nopeuden lisäämisen olla sitä vaikeampaa mitä nopeammin kappale jo liikkuu. Liikelakeja tarkastelemalla saadaan massan kasvulle täysin määrätty matemaattinen lauseke. Kaikki tällaiset ilmiöt tulevat havaittaviksi vasta, kun tarkasteltavat nopeudet ovat valon nopeuden suuruusluokkaa. Esimerkiksi 0,5 prosentin muutos janan pituudessa, hiukkasen elinajassa tai sen massassa edellyttää nopeutta $0,1 \cdot c = 30\,000$ km/s, joten on ymmärrettävissä, ettei inhimillisessä havaintomaailmassa voida saavuttaa näihin ilmiöihin minkäänlaista kosketusta.

Nopeudesta johtuva massan lisäys on suhteellisuusteoriassa suoraan verrannollinen kappaleen liike-energiaan. Einstein ilmaisi tämän sanomalla, että liike-energialla on massa. Samalla hän esitti rohkean yleistyksen väittämällä, että samoin on kaikella energialla massa ja että kääntäen kaikki massa voidaan käsittää myös energiaksi. Täsmällisemmin sanottuna Einsteinin väite on $E = mc^2$, missä E on energia ja m sen massa tai vastaavasti m jokin massa ja E sen edustama energiamäärä. Koska verrannollisuuskerroin c^2 on tavattoman suuri, tarvitaan valtava määrä energiaa, ennen kuin sen massa on havaittavissa punnitsemalla. Esimerkiksi energiamäärällä 1 kWh on massaa vain $4 \cdot 10^{-8}$ g. Vastaavasti 1 g:n massa edustaa energiamäärää 25000000 kWh, joten materia merkitsee todella suunnatonta energia varastoa.

Mittaamalla hyvin nopeasti liikkuvien alkeishiukkasten massoja on saatu määrät yksi liike-energian massa. Nukleonien⁷ välisistä vuorovaikutuksista johtuva potentiaalienergian massa on sekin havaittava osuus ytimen massasta.⁸ Edelleen on todettu hiukkasparien syntyminen sähkömagneettisesta säteilystä ja kääntäen niiden muuttuminen pelkäsi säteilyenergiaksi eli klassillisen kielenkäytön mukaan energian muuttuminen massaksi ja päinvastoin. Kaikissa näissä tapauksissa Einsteinin väite on osoittautunut paikkansapitäväksi. Ei olisi järkevää kuvitella, että se pienillekään energiamäärille olisi väärä, kun se on todistettu suurille. Voimme siis perustellusti väittää, että vedet yllä kellolla on suurempi massa kuin vetämättömällä, kuumalla kappaleella suurempi massa kuin kylmällä, polttoaineella (ja palamiseen käytetyllä hapella yhteensä) suurempi massa kuin palamistuloksilla, vaikka näiden asioiden havaitseminen punnitsemalla onkin mahdotonta. Toteamme siis, että klassillisen fysiikan kaksi suurta säilymlakia, massan ja energian häviämättömyys, ovatkin identtiset. Koska massa on energiaa ja energialla on aina massa, kumpikin lausuu saman fysikaalisen periaatteen.

Suhteellisuusteoria siis osoittaa, että monet klassillisen fysiikan absoluuttisina pitämät suureet ovatkin suhteellisia. Ei ainoastaan matka Roomaan vaan myös Rooman ja Pariisin välinen etäisyys on suhteellinen. Ei ainoastaan auton nopeus vaan myös auton ja jalankulkijan välinen nopeus ero on suhteellinen. Alkeishiukkasen tai yhtä hyvin ihmisen elinaika on suhteellinen. Kappaleen massa on suhteellinen, samoin monet muut tässä käsittelemättömät suureet. Näiden suureiden pitäisi

⁷ Nukleoni on ytimen rakenneosasten, protonien ja neutronien, yhteinen nimitys.

⁸ Tämä ilmenee siten, että ytimen massa on pienempi kuin sen erillisten rakenneosasten yhteenlaskettu massa. Keskiraskailta ytimillä tämä ns. massakato yhtä nukleonia kohden on suurin. Sen vuoksi ydinten potentiaalienergiaa vapautuu myös raskaiden ydinten, kuten uraanin tai plutoniumin, haljetessa. Huomattavasti suurempia energiamääriä saadaan kuitenkin keveiden ydinten yhtyessä.

kaiken järjen – ja klassillisen fysiikan – mukaan olla riippumattomia siitä, miten niitä tarkastellaan. Kuitenkin ne ovat erilaiset aina sen mukaan, kuinka nopeasti liikkuvasta systeemistä käsin niitä havaitaan. Suhteellisuusteoria antaa vieläpä täsmällisen ennusteen sille, millaisia nämä suureet milloinkin ovat.

On erittäin mielenkiintoista katsoa, mitä suhteellisuusteoria tarjoaa tuhoamien-
sa absoluuttisten suureiden tilalle. On kai oltava jokin objektiivinen todellisuus, josta subjektiiviset havainnot saadaan. Vastaus on verrattain abstraktinen ja siksi mahdollisesti vähän vaikeatajuinen. Sen selittämiseksi on turvauduttava suhteellisuusteorian yhteydessä usein käytettyyn puhetapaan ajasta neljäntenä ulottuvuutena. On nimittäin mahdollista määritellä matemaattinen neliulotteinen avaruus-aika, jossa kahden pisteen »etäisyys» on absoluuttinen suure. Määrätyssä kolmiulotteisen avaruutemme pisteessä tietynä hetkenä sattuva tapaus vastaa yhtä avaruus-ajan pistettä. Jokainen havaitsija voi mitata kahden tapauksen välisen »etäisyyden» neljä komponenttia. Kolme määrittelee tapausten kolmiulotteisen välimatkan, neljäs väliajan. Eri havaitsijat näkevät nämä komponentit erilaisina, mutta niistä tietyn säännön mukaan laskettu neliulotteinen »etäisyys» on kaikille sama.⁹ Samoin voidaan muodostaa absoluuttinen »neli-impulssi» liittämällä kolmiulotteiseen impulssiin komponentiksi liike-energia. Jälleen voidaan kaksi klassillisen mekaniikan tärkeää invarianssia yhdistää. Impulssin ja energian säilyminen ovat vain yhden ainoan perusluonteen suureen, »neli-impulssin», säilymisen eri ilmenemismuotoja. Kysymyksessä on varsin abstraktinen käsitteenmuodostustapa, jota on hyvin vaikea havainnollistaa. Konkreettista ymmärtämistä vaikeuttaa huomattavasti muun muassa se, että kahden erillisen pisteen välinen »etäisyys» voi olla myös nolla tai negatiivinen.

Liikkeen suhteellisuutta voidaan tarkastella yleisemminkin. Olemme tottuneet hyväksymään sen, että voimme todeta tasaisen etenemisliikkeen vain suhteellisesti. Sen sijaan huomaamme heti, jos ajoneuvomme nopeus muuttuu. Kiihdytettäessä kappaleet pyrkivät kohti takaseinää, jarrutettaessa ne lentävät eteenpäin. Pyörivässä liikkeessä taas kaikki pyrkii pois päin pyörimisakselista. Tarkemmin ajatellen asia ei kuitenkaan ole aivan ilmeinen. Jos olemme avaruusaluksessa tyhjässä avaruudessa, on voima, joka tarvitaan pitämään kappale paikoillaan, juuri se, joka pakottaa kappaleen seuraamaan alusta. Mittaamalla sen saamme siis määrät yksi aluksen kiihtyvyyden. Jos taas aluksemme onkin paikoillaan gravitaatiokentässä, toteamme myös, että tarvitaan voimaa pitämään kappale paikoillaan eli estämään sitä putoamasta. Katsomatta ulkopuolelle emme voikaan heti päätellä, kumpi tilanne on kysymyksessä.

Näissä tapauksissa on kysymys massan kahdesta hyvin erilaisesta ominaisuudesta. Edellisessä tilanteessa joudumme mittaamaan ns. hidasta massaa, joka ilmaisee kuinka vaikeaa kappaleen nopeuden muuttaminen on, jälkimmäisessä tapauksessa ns. gravitaatiomassaa, joka määrää kuinka suurella voimalla painovoimakenttä vaikuttaa kappaleeseen. Jos voisimme erottaa toisistaan nämä kaksi massan lajia, voisimme ratkaista, kumpi tilanne kulloinkin on kysymyksessä. Ko-

⁹ Tilanne voidaan täysin rinnastaa klassilliseen janan pituuden määrittämiseen Pythagoraan teoreeman avulla. Jos janan projektiot keskenään kohtisuorille akseleille ovat a ja b , on janan pituus tunnetusti $l = \sqrt{a^2 + b^2}$. Jos valitsemme toisen akseliston, jossa vastaavat projektiot ovat c ja d , on myös $\sqrt{c^2 + d^2} = l$. Projektiot eli komponentit ovat suhteellisia, mutta niistä voidaan aina laskea pituus, joka on absoluuttinen.

keellinen tutkimus on kuitenkin osoittanut, että ne ovat äärimmäisen tarkasti yhtä suuret.¹⁰

Yleinen suhteellisuusteoria olettaa hitaan massan ja gravitaatiomassan täysin samanarvoiseksi. Valitettavasti on siitä voitu johtaa kovin vähän mitattavia ennusteita, mutta ainakin tätä oletusta, ns. ekvivalenssiperiaatetta, pidetään nykyisin kokeellisesti vahvistettuna tosiasiana. Se merkitsee, ettei ole olemassa edes kiihtyvyyttä absoluuttisessa mielessä. Kaikille ilmiöille, joiden voimme ajatella johtuvan systeemimme kiihtyvyydestä tai sen pyörimisestä, on vaihtoehtoinen selitys, joka perustuu gravitaatioon. Liikkeen kiihtyvyyden tai pyörimisen toteaminen on siten mahdollista vain suhteellisesti, johonkin verrattuna. On siis mahdotonta ratkaista esimerkiksi, kumpi on oikeampi, Ptolemaioksen maakeskinen vai Kopernikuksen aurinkokeskinen kuva aurinkokunnasta. Molemmat ovat yhtä oikeutettuja. Edellinen on tosin epäkäytännöllisempi, koska luonnonlakien esitys tulee siinä mutkikkaammaksi, ellemmme käytä yleisen suhteellisuusteorian antamia yleisiä esitystapoja.

Kiihtyvyyden ohella myös gravitaatiokenttä menettää absoluuttisen merkityksensä. Fysikaalista luonnontodellisuutta luonnehtiviksi absoluuttisiksi suureiksi yleinen suhteellisuusteoria tarjoaa avaruus-ajan geometriaa kuvaavia käsitteitä. Erilaiset liikkeet ja painovoimakentät on sen mukaan käsitettävä tällaisen abstraktisen geometrisen todellisuuden eri ilmenemismuodoiksi, »komponenteiksi», joita voidaan mitata vain suhteellisesti.

Nykyisin pyritään teoriaa kehittämään siten, että myös sähkömagneettiset kentät – ja edelleen kaikki uudet alkeishiukkastutkimuksissa ilmenneet kentät – voitaisiin tulkita samalla tavalla avaruuden geometrisiksi ominaisuuksiksi. Tämän kehityskulun edistymisestä riippumatta on selvää, että kaikki luonnossa on suhteellisuusteorian lakien alaista. Tässä mielessä kaikki on suhteellista. Näin on tullut riistetyksi pohja monilta inhimilliselle ajattelullemme luonnostaan selviltä ja varmoilta näkemyksiltä, joita myös klassillinen fysiikka paljolti edustaa. Samalla suhteellisuus kuitenkin merkitsee havaintojemme erittäin täsmällisiä lainalaisuuksia. Näitä tutkimalla fysiikka pyrkii tunkeutumaan yhä syvemmälle etsiessään luonnon ilmiöiden taakse kätkeytyvää todellisuutta, joka ei ole suhteellinen.

Hiukkaset ja aallot

Suhteellisuusteoria merkitsi klassillisen fysiikan ajatustapojen perusteellista tarkistusta. Kuitenkin vanhoilla käsitteillä oli tämänkin jälkeen yhä jossain määrin sama merkitys kuin ennen. Vain käsitys niiden perusluonteesta oli syvempi ja täsmällisempi. Näiden uudistusten vaikutus aikaisemmin hahmoteltuun luonnon perusrakenteen klassilliseen kuvaan ei ollut ratkaiseva. Palaamme nyt tähän klassillisen fysiikan ydinkohtaan ja käymme tarkastelemaan niitä vaikeuksia, joihin perusobjektien lähempi tutkiminen samanaikaisesti suhteellisuusteorian kehittymisen kanssa johti.

¹⁰ Ensimmäisen tällaisen kokeen suoritti Eötvös 1909. Hän pääsi tarkkuuteen 1/200 000 000. Dicke on aivan viime vuosina tehnyt vielä tarkempia tutkimuksia. Vuonna 1961 hän tiedotti, että massojen ero on ainakin pienempi kuin 1/100 000 000 000.

Klassillinen fysiikka tunsikin kahdenlaisia perusobjekteja, hiukkasia ja kenttiä. Newtonin lait osoittivat, miten hiukkaset käyttäytyvät voimien vaikutuksen alaisena. Maxwellin yhtälöt hallitsivat sähkömagneettisia kenttiä. Erityisesti energian eteneminen saattoi tapahtua joko hiukkasten mukana tai kentässä etenevänä aaltoliikkeenä.¹¹ Näin muodostui vastakohta-asettelu hiukkaset – aaltoliike, joka koskee keskeisellä tavalla koko fysiikkaa, sillä kaikkeen luonnon tapahtumiseen välttämättä liittyy jotenkin energian siirtymistä. On siten täysin luonnollista, että monien ilmiöiden tutkiminen on aloitettu kysymällä, ovatko niihin osaaottavat objektit hiukkasia vai aaltoliikettä. Ensiksi tapaamme tämän kysymyksen valon yhteydessä. Vuosisadan vaihteen tienoilla opittiin tuntemaan monia uusia säteilyn lajeja, joita tutkittaessa se toistettiin. Esimerkiksi ns. katodisäteet osoitettiin hiukkasiksi, elektronisuihkuksi, ja röntgensäteily valon kaltaiseksi mutta lyhytaaltoisemmaksi sähkömagneettiseksi aaltoliikkeeksi. Radioaktiivisuuden tuottamasta säteilystä opittiin pian erottamaan kahdenlaisia hiukkasia, alfahiukkasia (heliumatomin ytimiä) ja beetahiukkasia (elektroneja), sekä gammasäteilyä, joka muodostui röntgeniäkin lyhyemmistä sähkömagneettisista aalloista.

Hiukkasten perusolemus eroaa ratkaisevasti aalto liikkeen perusolemukselta. Näiden kahden täsmällinen määrittäminen ei kuitenkaan ole aivan yksinkertaista. Yrittäessämme tätä tulemme pian vakuuttuneiksi siitä, että nämä käsitteet ovat suureksi osaksi intuitiivisia.

Hiukkanen on lähinnä ymmärrettävä objektiksi, jonka koko massa, varaus, energia, impulssi, impulssimomentti ynnä muut ominaisuudet ovat keskittyneet johonkin rajoitettuun avaruuden tilaan. Se on yksinkertaisesti sellainen, millaiseksi objekti pitää kuvitella, jotta Newtonin mekaniikkaa voitaisiin soveltaa siihen. Hiukkasella on joka hetki täsmällinen paikkansa, niin että sen liike noudattaa aivan tiettyä rataa, joka voidaan mekaniikan lakien avulla laskea. Jokainen hiukkanen on yksilö. Kaksi hiukkasta voivat törmätä yhteen, mutta ne eivät voi olla samassa tilassa edes osittain. Hiukkassuihkukin muodostuu erillisistä hiukkasista, joilla on kullakin oma määrätty ratansa suihkun sisällä.

Aaltoliike taas tapahtuu jossakin kentässä siten, että kenttää luonnehtiva suure, esimerkiksi kenttävoimakkuus- esimerkkinä voidaan pitää myös vaikkapa vedenpinnan korkeutta poikkeaa normaaliarvostaan laajalla alueella ja tämä poikkeama jollakin tavoin muuttuu ajan mukana. Perustyyppiä käsitetään säännöllinen, sekä ajallisesti että paikallisesti jaksollinen muuttuminen, jota luonnehtii tietty aallonpituus ja värähdysluku. Mielivaltainen aaltoliike voidaan aina esittää tällaisten aaltojen summana. Kuhunkin aaltoon liittyy näin aivan tietty määrä kutakin aallonpituutta ja värähdystaajuutta. Sähkömagneettisen kentän perustyyppinen aaltoliike on yksivärinen valo. Siihenkin liittyy Maxwellin teorian mukaan energiaa, impulssia, jopa impulssimomenttia jakautuneena koko aaltoliikkeen alueelle määrät yksi energia-, impulssi- ja impulssimomenttitiheydeksi. Vastakohtana hiukkasten yksilöllisyydelle on aaltoliikkeille leimaa-antavana täydellinen epäyksilöllisyys. Samassa kentässä voi aivan hyvin tapahtua useita eri aaltoliikkeitä. Tällöin ne yksinkertaisesti vain yhtyvät yhdeksi summa-aaltoliikkeeksi. Niiden aiheuttamat kenttävoimakkuuden poikkeamat kasautuvat päällekkäin, yhteenlaskeutuvat, kussakin kentän pisteessä erikseen. Vastakkaiset poikkeamat kumoavat toisensa ja samansuuntaiset vahvistavat toisiaan. Tämä ns. interferenssi merkitsee erityisesti sitä, että

¹¹ Vrt. huomautus s. 49.

kahden aaltoliikkeen yhtyessä näiden yhteinen energia tiheys on aivan eri tavoin jakautunut kenttään kuin molempien erikseen yhteenlaskettuna. Missä aallot sammuttavat toisensa, siellä energiatiheys häviää olemattomiin, missä ne taas vahvistavat toisiaan, siellä energiatiheys saattaa kasvaa huomattavasti yhteenlaskettua energiatihyettä suuremmaksi.

Hiukkasten paikallisuus ja yksilöllisyys ja toisaalta aaltoliikkeen laaja-alaisuus ja epäyksilöllisyys ovat selvästikin täysin vastakkaisia ominaisuuksia. Tarkastelkaamme vaikkapa yksinkertaista periaatteellista koetta, jossa tutkittava säteily kulkee kahden vierekkäisen raon läpi ja saapuu takana olevalle varjostimelle. Ajatelkaamme, että kyseessä on hiukkassuihku. Sopivan koejärjestelyn avulla on silloin mahdollista havaita yksityisten hiukkasten saapuminen esimerkiksi osumakohdassa näkyvänä valonvälähdyksenä ja todeta siten objektien paikallisuus. Tarkastelemalla kummastakin raosta saapuvia suihkuja erikseen ja molempia yhdessä voidaan todeta niiden yksilöllisyys. Kun kumpikin rako on auki, on saapuvien hiukkasten tiheys joka kohdassa varjostinta sama kuin osasuuhkuilla yhteensä. Jos sama koe tehdään aaltoliikkeellä, on mahdollista havaita varjostimelle saapuva jatkuva energiatiheys mutta ei mitään yksityisiä paikallisia välähdyksiä tms. Erityisesti todetaan, että eri raoista kulkevat osat interferoivat. Koko säteilyn energiatiheys varjostimella on erilainen kuin eri raoista tulevien yhteensä. Vaikeutena on se, että rakojen leveyden ja välin tulisi olla säteilyn aallonpituuden suuruusluokkaa, muutoin ilmiö ei erotu. Mutta jollakin tätä vastaavalla kokeella pitäisi ainakin periaatteessa olla mahdollista kerta kaikkiaan ratkaista, onko kysymyksessä hiukkassuihku vai aaltoliike.

Hankaluuksien alku syynä oli tälläkin kertaa valo. Se oli monien erilaisten interferenssikokeiden avulla täysin kiistattomasti todettu sähkömagneettisen kentän aaltoliikkeeksi. Kaiken piti sen suhteen olla täysin selvää, kunnes havaittiin ilmiötä, joiden selittäminen tältä pohjalta oli aivan mahdotonta.

Jokainen kappale lähettää lämpösäteilyä, joka on eräs sähkömagneettisen säteilyn muoto. Tavallisissa lämpötiloissa se on pitempiaaltoista kuin valo, mutta lämpötilan kohotessa tulee mukaan yhä lyhytaaltoisempaa säteilyä, ja riittävän korkeissa lämpötiloissa säteily on suureksi osaksi näkyvää valoa. Ilmeisesti sen energian jakautuminen eri aallonpituuksille riippuu hyvin voimakkaasti lämpötilasta. Kävi kuitenkin ilmi, että mitattua jakautumista oli mahdotonta selittää muutoin kuin olettamalla, että tiettyä aallonpituutta olevan säteilyn energia saattoi lisääntyä tai vähetä vain täysin määrättyinä yksikköinä, kvantteina, joiden suuruus oli $h\nu$ ($h =$ ns. Planckin vakio, $\nu =$ säteilyn värähdystaajuus).

Valosähköisessä ilmiössä valo irrottaa elektroneja metallipinnasta, johon se kohdistuu. Eräissä koeolosuhteissa elektronin olisi laskelmien mukaan pitänyt kerätä sähkömagneettisesta aaltoliikkeestä energiaa tuntikausia, ennen kuin se olisi kyennyt irrottautumaan. Kuitenkin ilmiö tapahtui täysin viivästyksettä. Tarkempi tutkimus osoitti, että irtoavat elektronit olivat saaneet kukin yhden kvantin energian, ikään kuin tämän suuruinen energiapakkaus olisi osunut niihin. Tässä oli selvästikin sentyyppinen ilmiö, jonka avulla äskeysessä kokeessa hiukkasten paikallisuus olisi voitu todeta.

Comptonin ilmiö havaitaan röntgensäteilyllä. Säteilyn kohdistuessa materiaan esiintyy sirontaa,¹² jolla on alkuperäistä pienempi värähtelytaajuus ν . Tämäkin olisi

¹² Sironnalla tarkoitetaan fysiikassa mitä tahansa ilmiötä, jossa esimerkiksi hiukkassuihku tai aalto liike osuu johonkin maaliin ja poikkeaa eli siroaa siitä eri suuntiin. Esimerkiksi päivätaivaan valoisuus on auringon valon sirontaa ilman kaasumolekyyleistä.

täysin mahdotonta, jos kyseessä olisi aaltoliike. Compton osoitti, että ilmiö selittyy täydellisesti, jos se käsitetäänkin valokvantin kimmoisaksi törmäykseksi elektroniin. Elektroni saa tällöin osan kvantin energiasta $h\nu$, joten värähdystaajuus ν pienenee.

Tämän kaltaisissa ilmiöissä sähkö magneettinen säteily olikin siis selvästi hiukkassuihku. Alettiin puhua fotoneista, valohiukkasista. Koska valo oli yhtä varmasti todistettu aaltoliikkeeksi, se oli siis jollakin tavoin kahtalainen, dualistinen, luonteeltaan. Se oli milloin hiukkasia, milloin aaltoliikettä, aina olosuhteiden mukaan. Tämä oli kokeellinen tosiasia.

Tässä tilanteessa (1924) huomautti de Broglie, että olisi luonnollista – kun keran aaltoliike oli osoitettu myös hiukkasiksi – että hiukkasetkin olisivat vastaavasti aaltoliikettä.¹³ Vuonna 1927 Davisson ja Germer osoittivat tämän idean oikeaksi elektronien osalta todetessaan elektronisuihkun interferenssi-ilmiön. Myöhemmin vastaava tulos on saatu monilla muilla hiukkasilla. Nykyisin tiedämme ajatuksen yleispäteväksi. On vain yhdenlaisia perusobjekteja, dualistisia.

Edellä tarkasteltuun periaatteelliseen kokeeseen nähden tämä merkitsee, että koe esimerkiksi elektronisuihkuun sovellettuna johtaisi ristiriitaiseen tulokseen. Sopivan koejärjestelyn avulla voitaisiin havaita yksityisten elektronien osumiskohdat varjostimella. Toteaisimme siis, että elektronit ovat paikallisia objekteja, ilmeisestikin hiukkasia. Molempien rakojen ollessa auki saataisiin varjostimelle kuitenkin osumakohtien jakautuma, joka olisi erilainen kuin se, mikä saataisiin laskemalla yhteen osasuuhkujen antamat jakautumat. Tapahtuisi toisin sanoen interferenssi-ilmiö, joka taas viittaisi aaltoliikkeeseen. Koe on tällaisenaan käytännössä mahdoton toteuttaa. Sen avulla havainnollistettu käyttäytyminen vastaa kuitenkin täsmälleen sitä, mikä monin eri kokein on havaittu luonnon perusobjektien, esimerkiksi juuri elektronien, todelliseksi luonteeksi.

Saadut tulokset näyttivät mahdottomilta. Hiukkaset eivät kerta kaikkiaan voi olla aaltoliikettä eivätkä aallot hiukkasia. Kokeellisesti havaittua totuutta ei voitu kieltää, mutta ei kai luonnon todellisuuskään voinut olla ristiriidassa itsensä kanssa. Ratkaisevan selvennyksen dualismia koskeviin ymmärtämisvaikeuksiin antaa ns. epätarkkuusperiaate, jonka Heisenberg esitti 1927. Sen mukaan on periaatteellinen raja, jota tarkemmin fysikaalisen ilmiön tapahtumisen yksityiskohtia ei ole mahdollista havaita kokeellisesti ja joka kytkeytyy määrättyllä tavalla Planckin vakioon h .

Mittaustarkkuus on tietysti aina ollut kokeellisen fysiikan keskeisiä ongelmia. Jokaiseen mittaukseen vaikuttavat aina monet häiritsevät sivutekijät, joita ei ole mahdollista kokonaan poistaa. Kun tutkimuksen tulokset ilmoitetaan, on niihin aina välttämätöntä liittää tiedot siitä, miten tarkasti virhelähteet on eliminoitu ja miten tarkkoja tulokset tämän perusteella ovat. Muuten tutkimus on arvoton. Epätarkkuusperiaate ei kuitenkaan koske tällaisten virhelähteiden vaikutusta vaan itse mittaustapahtuman häiritsevää vaikutusta tutkittavaan ilmiöön. Ilmiön seuraaminen edellyttää, että siihen osaa ottavista objekteista lähtee joitakin signaaleja, joiden välityksellä saamme informaatiota. Näiden signaalien lähteminen ei kuitenkaan kuulu itse ilmiöön vaan häiritsee sitä. Siksi ovat saadut tiedot informaatiota häiritystä eivätkä »puhtaasta» ilmiöstä.

¹³ Hän esitti perusteltuna käsityksenään, että valolla todettu fotonin energian E ja aalto liikkeen värähdystaajuuden ν välinen suhde $E = h\nu$ sekä fotonin impulssin p ja valon aallonpituuden λ välinen suhde $p = h/\lambda$. olivat universaalisia lakeja, jotka ilmaisivat kaikkien hiukkasten energian ja impulssin sekä niihin kytkeytyvän aaltoliikkeen taajuuden ja aallonpituuden välisen yhteyden.

Klassillisen fysiikan ajattelutapa edellytti kiinnittämättä tähän seikkaan oikeastaan huomiota, että kaikki virhelähteet – yhtä hyvin sivutekijöiden kuin itse mittauksen aiheuttamat häiriöt – voidaan sopivin koejärjestelyin aina pienentää ennalta asetettujen tarkkuusvaatimusten mukaisiksi. Mittausten yksipuolisuutta ja epätarkkuutta pidettiin periaatteessa epäoleellisena asiana. Käsitettiin, että ilmiöstä voidaan saada miten yksityiskohtainen ja tarkka kuva tahansa suorittamalla mittaukset riittävän huolellisesti ja varovaisesti. Heisenbergin mukaan tässä suhteessa oli olemassa periaatteellinen raja, jota on mahdotonta ylittää. Todellisin kokein tätä alarajaa on mahdotonta havaita vakion h tavattoman pienuuden vuoksi. Käytännössä mittaustarkkuus ei pääse sitä lähellekään. Sen olemassaolo voidaan kuitenkin todeta monien ns. ajatuskokeiden avulla.

Tarkastakaamme vaikkapa yksinkertaista mittausta, jolla pyritään seuraamaan jonkin kappaleen liikettä. Kappaleen näkeminen edellyttää, että siitä on lähtenyt valoa, jonka voimme havaita. Se on saattanut itse lähettää valon, tai sitten on kyseessä siihen kohdistettu ja siitä sironnut valo. Jos on kysymys makroskooppisesta esineestä tai vaikkapa mikroskooppisista tarkasteltavista bakteerista, tämän valosignaalin lähtemisellä ei ilmeisestikään ole mitään vaikutusta. Jos tarkasteltavana kappaleena taas on esimerkiksi elektroni, muuttaa yhden ainoankin fotonin osuminen hyvin voimakkaasti sen liiketilaa. Meidän on täysin mahdotonta saada selville, miten elektroni käyttäytyisi omiin oloihinsa jätettynä, koska sen havaittu käyttäytyminen on niin perusteellisesti häiriöinen. Paikanmäärityksen äärimmäinen tarkkuus on samaa suuruusluokkaa kuin mittaauksessa käytetyn säteilyn aallonpituus. Toisaalta on fotonin impulssi ja samalla sen elektronille antama häiriöimpulssi sitä suurempi, mitä pienempää aallonpituutta käytetään. Mitä tarkemmin siis haluamme tietää paikan, sitä huonommin meidän on mahdollista saada selville nopeutta (impulssi = massa \times nopeus).¹⁴

Epätarkkuusperiaatteesta seuraa erityisesti, että on mahdotonta todistaa elektronin hiukkaseksi. Kun sen liikkeen seuraaminen on mahdotonta, sen paikallisuutta ja yksilöllisyyttä ei voida tarkasti osoittaa. Sama pätee aaltoliikeluonteeseen. Sen, että jokin objekti käyttäytyy kuten hiukkanen tai kuten aaltoliike, voimme todeta vain siinä tapauksessa, että emme halua todeta sitä liian yksityiskohtaisesti. Klassillinen fysiikkakin oli jo kiinnittänyt huomiota aaltoliikkeen, lähinnä valon, ja hiukkasten käyttäytymistä hallitsevien lakien samanlaisuuteen. Välitön havainto ei voinut paljastaa, oliko jokin säteily hiukkasia vai aaltoliikettä. Tiettyyn rajaan asti sen ominaisuuksien selittäminen oli mahdollista kummallakin tavalla. Selitysmahdollisuuksien tarkempi analysointi epätarkkuusperiaatteen valossa osoittaa, että niitä eroavuuksia, jotka ehdottomasti ratkaisisivat asian jommankumman selityksen hyväksi, on mahdotonta havaita. Dualismin ristiriita ei siis olekaan koetuloksissa vaan niiden tulkinnoissa. Koetulosten perusteella ei ollut oikeutettua tehdä niin yksityiskohtaisia johtopäätöksiä kuin tulkinnot edellyttivät.

Yleisemmin mutta kvalitatiivisemmin näitä kysymyksiä selvittää Bohrin samana vuonna (1927) esittämä komplementaarisuusperiaate. Tämän mukaan jokainen koe rajoittaa itse tietyllä tavalla sen tiedon määrää ja laatua, mitä tutkittavasta

¹⁴ Jos aallonpituus on λ , on fotonin impulssi h/λ . Nämä suureet ilmaisevat samalla elektronin paikan epätarkkuuden $\Delta x \approx \lambda$ ja impulssin epätarkkuuden $\Delta p \approx h/\lambda$. Tästä ilmenee myös, miten Planckin vakio h kytkeytyy havaintotarkkuuden periaatteelliseen rajaan. Kertolaskun avulla saatava tulos $\Delta x \Delta p \approx h$ on juuri epätarkkuusperiaatteen täsmällinen esitysmuoto tällaiseen mittaukseen sovellettuina.

objektista kokeen avulla on mahdollista saada. Tiedon saamiseksi on mittaajan tai mittalaitteen välttämättä oltava havaittavan objektin kanssa jonkinlaisessa vuorovaikutuksessa, joka häiritsee objektin tarkasteltavaa tilaa. Jokainen mittaus antaa siis parhaimmillaankin ilmiön luonteesta yksipuolisen kuvan. Toisenlainen koe asettaa toisenlaiset rajoitukset, ja se voi valottaa ilmiön luonnetta kokonaan muulta kannalta. Tällöin eivät ehkä lainkaan käy ilmi ne piirteet, joita edellinen koe pystyi paljastamaan. Näiden kokeiden antamat kuvat tai kokeissa havaitut suureet ovat toisilleen komplementaariset. Niinpä esimerkiksi paikka ja impulssi ovat komplementaarisia suureita, koska toisen määrittäminen rajoittaa toisen mittaamismahdollisuuksia. Voimme myös sanoa, että aaltoliike ja hiukkanen ovat toisilleen komplementaarisia kuvia samasta objektista.

Dualismi on kokeellinen tosiasia. Joissakin ilmiöissä perusobjektit käyttäytyvät paljolti siten kuin hiukkasten odotetaan käyttäytyvän, joissakin toisissa yhteyksissä taas kuten aaltoliike. Meidän on pakko myöntää, etteivät ne ole kumpaakaan vaan jotakin muuta, jota ei ole aivan helppo konkreettisesti tajuta. Newtonin mekaniikalla on merkitystä elektronille vain siinä määrin, kuin elektronia voidaan pitää hiukkasena, Maxwellin yhtälöillä taas valolle vain sikäli, kuin valo on aaltoliikettä. Klassillisen fysiikan perusyhtälöiden pätevyys siis lakkaa atomien suuruusluokan ilmiöissä, koska niiden käyttämällä käsitteillä ei ole näille ilmiöille merkitystä. Makroilmiöissä sen sijaan tiedämme niiden pätevän. Makromaailmassa myös hiukkanen ja aaltoliike ovat täysin selviä käsitteitä, ja klassillisten perusyhtälöiden voimassaolo todistaa, että ne ovat siellä fysikaalisestikin oikeutettuja.

Näemme nyt selvästi, että hiukkanen ja aaltoliike ovat vain kaksi konkreettista mallia. Klassillinen fysiikka kuvaa niiden avulla erittäin hyvin kaikkia makroilmiöitä. Atomimaailman ilmiöitä sen sijaan voidaan niiden avulla kuvata vain rajoitetusti. Nämä kaksi mallia nojautuvat hyvin voimakkaasti jokapäiväiseen konkreettiseen aistihavaintoon, ja juuri sen tähden ne tuntuvat meistä luonnollisilta ja ymmärrettäviltä. Atomimaailma on täydellisesti aistihavaintomaailman ulkopuolella, eikä loppujen lopuksi ole mitään syytä, minkä vuoksi kokemuseräiset konkreettiset käsitteet sopisivat siellä tapahtuvien ilmiöiden kuvaamiseen. Jos selitämme itse perusobjekteja havaintomaailmasta saatuun kokemukseen nojautuen, kun tarkoituksena on selittää havaittavia luonnon ilmiöitä perusobjektien avulla, on kysymyksessä auttamaton *circulus vitiosus*.

*Atomin rakenne ja kvantittuminen*¹⁵

Klassillisen fysiikan pätemättömyys perusobjektien pienoismaailmassa koettiin kouraan tuntuvasti, kun yritettiin selittää atomin rakennetta. Tässä yhteydessä pätemättömyys kävi ilmeiseksi oikeastaan paljon ennen, kuin yleisestä dualismista oli aavistustakaan. Vuosisadan vaihteessa oltiin jo selvillä siitä, että atomeissa oli varattuja rakennesosia, sekä negatiivisia että positiivisia. Ensimmäisen selvän tiedon niiden osuudesta atomin rakenteeseen antoi Rutherfordin sirontakoe,¹⁶ joka suoritettiin ensimmäisen kerran 1911. Jo tämä oli klassilliselle teorialle tyrmäävä.

¹⁵ Suureen kvantittuminen tarkoittaa alun perin sitä, että suureella on pienin jakamaton yksikkö, jonka monikertoja kaikki sen mahdolliset arvot ovat. Käsite on kuitenkin yleistynyt tarkoittamaan myös tapauksia, joissa suure voi saada ylimalkaan joitakin erillisiä arvoja

¹⁶ Vrt. huomautus s. 37.

Rutherfordin kokeessa kohdistettiin alfahiukkasten (He-ytimien) suihku ohueen kultakaivoon ja todettiin, että suurin osa suihkusta meni läpi sellaisenaan, kuin välissä ei olisikaan mitään, ja vain pieni osa sirosi. Kvalitatiivisesti tämä havainto merkitsee, että suurin osa atomista on tyhjää. Atomien läpimitan tiedettiin olevan 1 Ångströmin (10^{-7} mm) suuruusluokkaa. Mitatusta sironnasta voitiin kvantitatiivisesti päätellä, että se aiheutui massiivisista hiukkasista, joiden läpimita oli ainakin alle 0,001 Å ja joilla oli aineen järjestysluvun¹⁷ osoittama määrä positiivisia alkeisvarauksia¹⁸. Tällä tavoin opittiin ensimmäistä kertaa tuntemaan atomin rakenne sellaisena, miksi sen nyt tiedämme: keskellä on positiivisesti varattu ydin, johon melkein koko atomin massa on keskittynyt, ja sen ympärillä elektroniverho.

Klassillisen mekaniikan mukaan tällainen rakenne oli mahdollinen vain, jos elektronit kiersivät ydintä suurella nopeudella – kuten planeetat aurinkoa – välttyäkseen putoamasta ytimeen elektronien ja ytimen välillä vallitsevan voimakkaan sähköisen vetovoiman vaikutuksesta. Kun ne kuitenkin olivat varattuja hiukkasia, olisi niiden klassillisen fysiikan mukaan pitänyt säteillä tämän liikkeen johdosta sähkömagneettista säteilyä. Näin olisivat elektronit hyvin nopeasti, sekunnin mittatörmässä murto-osassa, säteilleet pois ytimen kentässä olevan potentiaalienergiansa ja pudonneet ytimeen yhtä kaikki. Pysyvien atomien olemassaolo oli siis sinänsä auttamaton todistus klassillista fysiikkaa vastaan. Atomi oli »potilas, joka pysyi hengissä lääketieteen häpeäksi».

Atomien lähettämä valo on hyvin tärkeä atomin rakennetta koskevan tiedon lähde. Sille on ominaista ns. viivaspektri. Tämä merkitsee, että jonkin tietyn aineen atomit pystyvät lähettämään vain täsmälleen määrättyjä värähdystaajuuksia. Tähän aikaan tunnettiin jo valon energian kvantittuminen eli se, että kutakin taajuutta v saattaa syntyä tai hävitä vain energiakvantteina $h\nu$. Viivaspektri siis merkitsee, että atomi voi luovuttaa ja vastaanottaa vain täsmälleen määrättyjä energiamääriä, jotka ovat helposti laskettavissa sen spektriviivojen taajuuksista. Tästä tehtiin se johtopäätös, että atomin kokonaisenergia voi saada vain määrättyjä erillisiä arvoja, mikä sittemmin myös kokeellisesti suoraan osoitettiin.

Atomien kokonaisenergian kvantittuminen oli ilmeisesti ongelman ydin. Se selitti kvalitatiivisesti atomin rakenteen pysyvyyden. Kun energia on saavuttanut alimman mahdollisen arvonsa, sen säteily pois atomista ei enää ole mahdollista eivätkä elektronit enää pääse putoamaan lähemmäs ydintä. Tämä ilmiö itse vain oli käsittämätön. Klassillisen mekaniikan mukaan kaikkien energian arvojen pitäisi olla mahdollisia. Oli kysymyksessä jokin ennen tuntematon luonnonlaki, jonka säännönmukaisuudet täytyi saada selville.

Bohr yritti liittää tällaista luonnonlakia Newtonin mekaniikkaan. Hän löysikin yksinkertaisen matemaattisen säännön, kvanttiehdon, jonka avulla hän saattoi valita atomin elektroneille klassillisen mekaniikan tarjoamista mahdollisuuksista joukon

¹⁷ Järjestysluku osoittaa alku aineen aseman ns. jaksollisessa järjestelmässä, joka oli alun perin laadittu kemiallisissa ominaisuuksissa ilmenevien säännönmukaisuuksien perusteella. Alkuaineet olivat siinä harvoja poikkeuksia lukuun ottamatta atomipainojensa mukaisessa järjestyksessä, ja yleisesti ymmärrettiin, että järjestelmä liittyi läheisesti atomien rakenteeseen.

¹⁸ Alkeisvaraus on sähkövarauksen luonnollinen jakamaton yksikkö, jonka monikertoja kaikki luonnossa esiintyvät varaukset ovat. Millikan osoitti sen olemassaolon ja määräsi sen suuruuden 1903 suorittamallaan kuuluisalla kokeella. Melkein kaikilla tunnetuilla varatuilla alkeishiukkasilla on yksi alkeisvaraus. Elektronilla se on negatiivinen, ytimen protoneilla positiivinen. Negatiivinen ja positiivinen alkeisvaraus ovat täsmälleen yhtä suuret, joten protonien ja elektronien sama määrä takaa atomin sähköisen neutraalisuuden.

erikoisasemassa olevia ratoja. Vetyatomien elektronien näin laskettujen ratojen energiat yhtyivät hyvin tarkasti kokeellisiin tuloksiin, mutta tähän menestys suurin piirtein loppuikin. Tämä ns. Bohrin kvanttimekaniikka johti yksityiskohdissaan ristiriitaisiin tuloksiin. Uuden olettamuksen keinotekoinen kytkeminen vanhaan teoriaan osoittautui mahdottomaksi.

Kvantittuminen ei kuitenkaan ole aivan outoa klassillisellekaan fysiikalle. Päinvastoin se on hyvin tyypillinen ilmiö klassillisessa aaltoliikeopissa. Kun aaltoliike suljetaan rajoitettuun tilaan, se heijastuu siellä edestakaisin ja interferoi itsensä kanssa. Yleensä se tällöin sammuttaa itsensä. Vain täysin määrätyt erilliset värähdysluvut johtavat ns. seisovaan aaltoliikkeeseen ja jäävät siten »elämään» pitempään systeemin säännöllisinä värähtelyinä. Näin esimerkiksi jännitetty kieli tai kalvo muodostaa klassillisen systeemin, jonka värähdysluku on jyrkästi kvantittunut. Kun de Broglie esitti hypoteesinsa, joka koski hiukkasiin liittyvää aaltoliikettä, tarttui Schrödinger ajatukseen ja selitti atomien erilliset energiatilat juuri tällä tavalla, elektroniaaltojen seisovina aaltoliikkeinä. Hän osoitti myös, miten tältä pohjalta lähettäessä voidaan laskea esimerkiksi vetyatomien energiat. Tulos oli täsmälleen sama kuin Bohrin teoriassa ja siis havaintojen kanssa yhtäpitävä.

Alun perin de Broglien ja Schrödingerin ajatuksena oikeastaan oli, että kaikkien hiukkastenkin perusolemus olisi pohjimmaltaan jonkinlainen aaltoliike. Havaittavat hiukkaset olisivat vain eripituisten aaltojen yhtymisestä muodostuneita kasautumia, »aaltopaketteja». Tämä selitys ei selvästikään tehnyt täyttä oikeutta elektronien hiukkasluonteelle. Schrödingerin aaltomekaniikan mukaan laskettaessa todetaan esimerkiksi, että vapaiden elektronien pitäisi vähitellen levitä ja esteen kohdattessaan jopa jakautua osiin. Havaitut elektronit ovat kuitenkin aina samanlaisia. Niillä on muun muassa täsmälleen määrätty massa ja varaus. Schrödingerin aaltomallin puitteissa oli lisäksi mahdotonta ymmärtää, miksi elektroniaallon osat eivät elektronin varauksesta huolimatta olleet keskenään vuorovaikutuksessa.

Dualismin merkityksen myöhemmin kirkastuttua Bohrin ja Schrödingerin teorit voitiin ymmärtää atomin komplementaariseksi selitysyrytyksiksi. Edellinen näki atomin pienoisauringonkuntana, jossa elektroniplaneetat huimaavalla nopeudella kiersivät ydinaurinkoa määrättyjä ratojaan. Jälkimmäinen taas näki elektroniverhon eräänlaisena ydintä ympäröivänä, seisovan aaltoliikkeen muodostamana pilvenä. Kummallakin kuvalla oli osittainen oikeutuksensa. Jälkimmäistä on pidettävä parempana, koska siihen liittyi luonnollinen mekanismi, joka selitti energian kvantittumisen. Ilmeisesti siis elektronien aaltoluonne on hieman vallitsevampi atomissa. Konkreettisten havaintomallien pakkopaitaan puettuina kuvina ne olivat kuitenkin molemmat tuomitut epäonnistumaan.

Olemme auttamattomasti tilanteessa, jossa ymmärryksemme ei enää voi saada tukea konkreettisista havaintomalleista. Perusobjektien luonteen parempi hallitseminen ja siis esimerkiksi atomin rakenteen ymmärtäminen edellyttää väistämättömästi abstraktista käsitteenmuodostusta. Aaltokuvan varsin voimakkaasta oikeutuksesta on osoituksena, että siihen perustuva Schrödingerin teoria avasi tien tähän kehitykseen.¹⁹ Historiallisessa kehityskulussa ei edes ole nähtävissä mitään selvää rajakohtaa. Aaltomekaniikka tarjosi valmiin matemaattisen koneiston, jonka uusi

¹⁹ Tässä yhteydessä on mainittava, että Heisenberg otti kokonaan toisen klassillisista malleista riippumattoman lähtökohdan ja kehitti oman abstraktisen rakennelmansa atomimaailman käsittelyä varten. Schrödingerin ja Heisenbergin teorit osoittautuivat kuitenkin myöhemmin saman yleisen teorian eri esitysmuodoiksi.

abstraktisempi tulkinta teki käyttökelpoiseksi kaikkiin atomimaailman ilmiöihin. Näin syntyi kvanttimekaniikka, jonka avulla ilmeisesti voidaan selittää kaikki atomeja sekä materian fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia koskevat havaintotulokset. Ainakin sen menestys on tähän päivään asti ollut täydellinen kaikissa sellaisissa tapauksissa, joissa teorian edellyttämät laskelmat on pystytty suorittamaan. Aivan viime vuosien tutkimusten mukaan näyttää siltä, että kvanttimekaniikan avulla voidaan laskea myös atomiydinten rakenne ja ominaisuudet.

Kvanttimekaniikan ajatusmaailma on ratkaisevasti erilainen kuin klassillisen fysiikan. Siihen ei liity mitään varsinaista kuvaa objektien olemuksesta. Sen käyttämä aaltofunktiokin on vain abstraktinen laskusuure, joka kuitenkin määrätyllä tavalla esittää objektin tai systeemin tilaa. Systeemiä kuvaavilla fysikaalisilla suureilla ei yleensä ole täsmällisiä arvoja. Sen tilaa vastaavasta aaltofunktiosta voidaan laskea ainoastaan todennäköisyydet suureiden kaikille mahdollisille arvoille. Vaikka siis systeemi on täysin tunnetussa tilassa, ei silti ole mahdollista tietää, mikä arvo jollekin sitä kuvaavalle suurelle saadaan mitattaessa. Voidaan määrätä ainoastaan, millä todennäköisyydellä mittaus antaa minkin mahdollisen arvon. Joissakin tiloissa suurella kyllä voi olla myös täsmällinen arvo. Tämän arvon todennäköisyys on silloin yksi. Tällaisia tiloja kutsutaan suureen ominaistiloiksi ja vastaavia arvoja suureen ominaisarvoiksi. Ominaisarvot ovat suureen ainoat mahdolliset määrättyt arvot. Näin kvanttimekaniikka ennustaa kullekin suurelle sen mahdollisen kvantittumisen tai kvantittumattomuuden. Kvantittumattomalla suureella – kuten hiukkasen paikalla – ei voi koskaan olla täysin määrättyä arvoa, vaan sen arvo on jossakin määrin epätarkka jokaisessa mahdollisessa tilassa. Systeemin saattaminen sellaiseen tilaan, jossa jonkin suureen epätarkkuus on pieni, merkitsee yleensä muiden suureiden arvojen tulemistä epämääräisemmiksi. Näin siis teoriaan sisältyy suureiden keskinäinen komplementaarisuus ja epätarkkuusperiaate. Todennäköisyys sille, että hiukkanen tavataan jostakin paikasta, riippuu vain hiukkasesta esittävän aaltofunktion arvosta kyseessä olevassa pisteessä. Aaltoluonnetta osoittavat havaitut interferenssi-ilmiöt johtuvatkin siis abstraktisena laskusuurena käytetyn aaltoliikkeen interferenssistä. Kvanttimekaniikkaan sisältyy näin, tosin abstraktisessa muodossa, selitys kaikkiin tarkastelemiimme luonnon käsittämättömiin piirteisiin, jotka näyttivät johtaneen fysiikan umpikujaan.

Klassillisen fysiikan selvän ja havainnollisen käsittelytavan jälkeen kvanttimekaniikka vaikuttaa hämmentävältä. Inhimillinen ymmärrys tuntuu kaipaavan siitä jotakin. On kuin se jättäisi liian avoimeksi monia kysymyksiä, esimerkiksi juuri perusobjektien luonteen, koska sen antamat selitykset ovat niin abstraktisella tasolla. Konkreettinen käsityskykymme kokee puutteeksi sen, ettei ole mahdollista yksityiskohtaisesti seurata fysikaalisten suureiden muuttumista ilmiöissä niin kuin oli laita klassillisessa fysiikassa. Aaltofunktio tosin muuttuu täysin määrätyllä tavalla. Kun se kuitenkin ilmaisee vain mitattavien suureiden todennäköisyyksiä, ei sen antama kuva ilmiöistä ole deterministinen. Muuttuvien suureiden hetkelliset havaittavat arvot eivät määrää suureiden arvoja edes pieneksi hetkeksi eteenpäin. Kuitenkin kvanttimekaniikka antaa kaiken, mitä teorialta kokeellisen tutkimuksen kannalta voidaan vaatia: oikeita ennusteita. Se on lisäksi ainoa tapa, jolla pystymme käsittelemään perusobjekteja, siis myös ainoa mahdollisuutemme ymmärtää niitä. Se selittää nekin tulokset, jotka sama konkreettinen käsityskykymme kokee keskenään ristiriitaisiksi. Kannattaa huomata, että kaikkiin niihin ilmiöihin nähden, joissa Planckin vakio ($h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ kgm}^2/\text{s}$) voidaan katsoa häviävän pieneksi esiinty-

viin suu reisiin verrattuna,' kvanttimekaniikka supistuu klassilliseksi fysiikaksi siten, että kaikki klassillisten lakien mukaiset tapahtumat saavat todennäköisyyden 1, muut todennäköisyyden 0. Se on siis klassillista mekaniikkaa paljon laajempi ja täydellisempi ja sellaisena myös parempi teoria. Hämmennyksemme on vain hinta, joka on maksettava siitä, että konkreettiset mallit eivät sovellu näin kaukana havaintomaailmamme mittakaavasta tapahtuviin ilmiöihin.

Kentät ja alkeishiukkaset

Kvanttimekaniikan syntyhistoria toi ilmi fysikaalisten suureiden kvantittumisen eräänä hyvin keskeisenä luonnonilmiönä. Ilmeisesti tämä ajatus esiintyi ensiksi valon luonteen tarkastelun yhteydessä, kun opittiin tuntemaan säteilyenergian kvantti. Atomin rakennetta kuvaavien fysikaalisten suureiden kvantittuminen oli kuitenkin ensimmäinen tällainen ilmiö, joka jollakin tavoin opittiin ymmärtämään yleisempien luonnon ilmiöiden seuraukseksi. Vasta tämä oikeastaan pani kysymään, olisiko jokin vastaavanlainen mekanismi vastuussa myös valon kvantittumisesta, toisin sanoen fotonien olemassaolosta. Yleinen dualismi paljasti sen, että tämä kysymys oli vielä paljon yleisempi. Jos kerran fotonit ja esimerkiksi elektronit olivat rinnastettavia objekteja, jokainen alkeishiukkanen ehkä olikin vain kvantti, jonka olemassaolo ja ominaisuudet olivat selitettävissä jonkin luonnossa piilevän kvantittumismekanismien avulla.

Olemme toistaiseksi kokonaan sivuuttaneet klassillisen fysiikan käyttämän kentän käsitteen kohtalon tässä uudistusten myllerryksessä. On selvää, että kenttä on hiukkasen ja aaltoliikkeen tavoin konkreettinen malli, jolla on vain osittainen oikeutuksensa. Se oli alun perin kappaleiden välisen vuorovaikutuksen ymmärtämiseksi ajateltu mekanismi. Gravitaatiokenttä selitti painovoiman, sähkömagneettinen kenttä sähkömagneettiset vuorovaikutukset. Aaltoliike oli oikeastaan ainoa tapa, jolla kenttä fysikaalisessa havainnossa saattoi esiintyä itsenäisenä objektina.²⁰ Se oli siis ainoa todiste kentän fysikaalisesta olemassaolosta. Dualismin selvittyä voitiin aiheellisesti kysyä, eikö mitä tahansa alkeishiukkasia aivan yhtä hyvin voitu käsittää jonkin juuri niitä vastaavan kentän ilmentymiksi, jos kerran fotonit olivat sähkömagneettisen kentän ilmenemismuoto. Tämäntapaisesta kysymyksenasettelusta sai alkunsa kenttien kvanttiteoria.

Oikeastaan kenttä oli – toisin kuin aalto ja hiukkanen – jo klassillisessakin fysiikassa jossain määrin abstraktiseen vivahtava käsite. Kenttien kvanttiteoriassa se on pelkästään abstraktinen. Kutakin perusobjektia vastaa tietty kenttä, jonka kvantti se on. Kutakin kenttää hallitsee sen oma kenttäyhtälö, josta kyseisen objektin havaittava käyttäytyminen ja mitattavat ominaisuudet pitää voida laskea. Fotonin osalta teoriaa kutsutaan kvanttisähködynamiikaksi, joka on tämän teorian onnistuneimpia osia. Voidaan sanoa, että sen avulla valosta on tullut yksi parhaiten ymmärrettyjä perusobjekteja. Maxwellin teoria voidaan johtaa siitä erikoistapauksena samoin kuin Newtonin mekaniikka kvanttimekaniikasta. Sen ennustamat poikkeamat klassillisesta teoriasta on voitu kokeellisesti vahvistaa. Se osoittaa esimer-

²⁰ Gravitaatioaaltojen havaitsemista on yritetty vuodesta 1960 alkaen. Gravitaatiokentän heikkouden vuoksi tällaiset kokeet ovat tavattoman vaikeita, eikä ainakaan toistaiseksi ole kuulunut tietoja positiivisista havainnoista. Teoriassa puhutaan myös vastaavasta kvantista, gravitonista, mutta on esitetty epäilyjä, ettei sitä koskaan havaittaisi.

kiksi, mitkä fysikaaliset tilanteet johtavat aaltoluonteen, mitkä hiukkasluonteen ilmenemiseen. Se siis selittää valon dualismin.

Mahdollisuus käsittää tietynlaatuiset hiukkaset jollakin salaperäisellä tavalla saman kentän kvanteiksi merkitsee, että hiukkasia ei voida yksilöidä. Tämä ominaisuus, jonka saatoimme aavistaa jo dualismin yhteydessä ilmenneistä tosiasioista, erottaa todellisen hiukkasen jyrkästi klassillisesta. Jos tarkasteltavassa systeemissä, esimerkiksi atomissa, on useita elektroneja, ei ole edes periaatteessa mahdollista seurata yksityistä elektronia systeemin sisällä. Oikeastaan siellä ei ole erityisiä elektroneja. Systeemiin kyllä kuuluu täsmällinen määrä elektroneja, ja ainakin periaatteessa jonkin yksityisen elektronin olemassaolo voidaan siellä hetkellisesti havaita. Toisessa kokeessa havaitulla elektronilla ei kuitenkaan voi olla mitään yhteyttä edelliseen elektroniin. Elektroni on tosin hyvin tarkalleen määrätty ominaisuuksiltaan; sillä on esimerkiksi tietyn suuruinen massa ja varaus. Tämä juuri tekee mahdolliseksi tuntea elektronin, erottaa sen muista hiukkasista. Elektronilla ei kuitenkaan ole mitään sellaisia ominaisuuksia, joiden avulla olisi mahdollista erottaa yksi elektroni toisesta. Ne ovat täysin identtisiä. Jos me käsitämme ne jonkin, vaikkapa abstraktisenkin, kentän kvanteiksi, voimme ehkä tajuta, että yksityinen elektroni on ainutkertainen havainto; se ei ole yksilö. Ei ole ylimalkaan mielekäästä edes kysyä, oliko toisella kertaa havaittu elektroni sama kuin aikaisemmin nähty, yhtä vähän kuin kukaan kysyy meren rannalla, ovatko tämänpäiväiset aallot tai vesipisarot samoja kuin eiliset.

Hiukkasten välinen vuorovaikutus on tässä yhteydessä vain yksi fysikaalinen ilmiö muiden rinnalla, ja sitä koskevat mittaustulokset pitäisi voida laskea teorian abstraktisista periaatteista käsin. Kysymystä käsittelevä formalismi saatetaan tulkita jotenkin seuraavaan tapaan. Hiukkasen varaus merkitsee sen kykyä lähettää ja vastaanottaa fotoneja. Varattujen kappaleiden välinen sähkömagneettinen vuorovaikutus on seurausta niiden välisestä fotonien vaihdosta, joka kuitenkin on luonteeltaan sellaista – »niin nopeata» – etteivät fotonit prosessin missään vaiheessa ennätä realisoitua. Monenlaiset häiriöt sen sijaan aikaansaavat helposti tämän realisoitumisen, ja syntyy sähkömagneettista säteilyä. Tämä tulkinta poistaa sen klassillisen fysiikan herättämän filosofisen kiistakysymyksen, onko kahden kappaleen välinen kaukovaikutus tyhjän avaruuden läpi ajatuksellisesti mahdollista. On sitten eri asia, onko tulkinnan pohjana oleva abstraktinen formalismi ajatuksellisesti ymmärrettävämpi.

Tämänsuuntaiset laskelmat johtivat Yukawan 1935 ennustamaan hiukkasen, jonka massa olisi elektronin ja nukleonin massan välillä ja joka olisi vastuussa ytimen rakenneosasten välisistä vahvoista vuorovaikutuksista samalla tavalla kuin fotonit sähkömagneettisista. Tämän hiukkasen, pionin eli pii-mesonin, löytyminen 1947 (Powell ja Occhialini) merkitsi huomattavaa voittoa uudelle kenttäteorialle.

Nykyisin tunnetaan lukuisia erilaisia alkeishiukkasia ja uusia löydetään jatkuvasti. Vuoden 1966 loppuun mennessä luku oli jo kohonnut noin kahteensataan. Vain ani harvat alkeishiukkasista ovat pysyviä. Suurin osa niistä hajoaa hyvin nopeasti toisiksi hiukkasiksi. Lyhyimmät ns. resonanssien eliniät ovat samaa suuruusluokkaa kuin se aika, jonka valo tarvitsee kulkeakseen ytimen läpimitan verran. Kenttien kvanttiteoria ei ole useista menestyksistään huolimatta pystynyt selittämään niitä ja niiden ominaisuuksia, vaan on ajautunut umpikujaan. On myös paljastunut uusia invariansseja, jotka energian, impulssin ja impulssimomentin säilymislakien rinnalla rajoittavat hiukkasten välisiä reaktiomahdollisuuksia. Olemme

monien ratkaisemattomien kysymysten edessä. Miten voimme ymmärtää alkeisobjektien näennäisesti tarpeettoman suuren joukon? Onko ehkä jokin yleinen kvanttummekanismi, joka määrää, mitkä alkeishiukkasten massat ovat mahdollisia? Mitkä yleiset periaatteet määräävät niiden ominaisuudet? Teoreetikot ovat ehdotelleet monia ideoita näiden ongelmien ratkaisuksi. Toistaiseksi voidaan parhaistakin sanoa vain, että ne ovat onnistuneet valaisemaan kysymyksiä uusilta puolilta.

Mielenkiintoisimpia oivalluksia on ollut kysymysten liittäminen symmetriaperiaatteisiin. Jo aikaisemmin oli osoitettu, että impulssin, energian ja impulssimomentin säilymislait ovat seurausta avaruuden ja ajan homogeenisuudesta ja avaruuden isotrooppisuudesta,²¹ siis täysin geometrisista symmetriaominaisuuksista. Muiden säännönmukaisuuksien selittäminen näihin rinnastettavalla tavalla on avannut hedelmällisiä näköaloja. Näin olemme joutuneet alkeishiukkasfysiikassa samoille linjoille kuin suhteellisuusteoriassa, nimittäin ilmiöiden palauttamiseen avaruuden ja ajan geometriaan. Selvimpiä tavoitteita onkin nykyisin sellaisen yleisen teorian kehittäminen, joka sisältäisi sekä kvanttimekaniikan että suhteellisuusteorian. Ratkaisevaa kokoavaa ajatusta, joka myös avaisi alkeishiukkasten maailman ymmärryksellemme, odotamme kuitenkin yhä.

Fysikaalinen todellisuus ja todellisuus

Luonnontiede lähtee siitä käytännöllisestä näkemyksestä, että on ihmisen ulkopuolinen todellisuus, josta havaintomme välittävät informaatiota. Tässä suhteessa eri objektien välillä ei ole eroa. Tuoli jolla istun, ihminen jonka tapaan tai jonka kanssa puhun puhelimessa, on todellisuutta eikä ainoastaan aistimusteni tulkinta. Myös alkeishiukkanen, jonka mittalaitteeni rekisteröi, on todellinen olemassa oleva objekti, vaikka sen toteaminen aistihavainnon avulla ei olekaan mahdollista. Sitä havaitsevan laitteen rekisteröintimekanismi on jopa paljon suurempi kuin aistihavainnon mekanismi. Elektroni esimerkiksi on sitä paitsi hyvin yksinkertainen objekti, ja se voidaan täydellisesti tunnistaa harvojen tiettyjen ominaisuuksien avulla. Ihminen sen sijaan on hyvin monimutkainen objekti, jolla on suunnaton määrä ominaisuuksia, ja mahdollisuuteni tuntea hänet yhtä täydellisesti ja tunnistaa hänet yhtä varmasti ovat olemattomat. Loppujen lopuksi on monin verroin perustellumpaa sanoa, että laitteeseeni saapui elektroni, kuin kertoa esimerkiksi, että ystäväni soitti minulle puhelimella.

Luonnontiede pyrkii selvittämään, millainen luonnon todellisuus on. Galileista asti on ymmärretty, että yksin havainto ylimpänä ja ainoana auktoriteettina voi antaa vastauksen tähän kysymykseen. Yksityiset mittaustulokset ovat tietysti enemmän tai vähemmän yksipuolisia ja epätarkkoja, mutta ne täydentävät toisiaan ja niiden yhteistuloksena on yhä tarkempi ja laajempi todellisuuden kuva. Kaikki tieto, mikä on mahdollista saavuttaa luonnontieteellisten kokeiden avulla, on eräänlaista objektiivista totuutta, ja voimme kutsua sen muodostamaa kokonaisuutta fysikaaliseksi todellisuudeksi.

Fysiikan ei ole mahdollista sanoa mitään siitä, onko fysikaalinen todellisuus

²¹ Isotrooppisuus tarkoittaa, ettei ole mitään erikoisasemassa olevia suuntia vaan että kaikki suunnat ovat keskenään täysin saman arvoiset.

koko todellisuus. Tämä on metafyyminen kysymys. Olemme todenneet, että luonnontiede voi tutkia ainoastaan sellaisia objekteja ja ilmiöitä, jotka noudattavat joi-takin säännönmukaisuuksia. Muunlaiset asiat eivät siis kuulu fysikaaliseen todelli-suuteen. Tämä on selvä rajoitus, mutta fysiikka ei ole oikeutettu edes kysymään, onko raja todellinen vai vain näennäinen, toisin sanoen onko sen toisella puolella mitään. Lause ei kuitenkaan ole merkityksetön. Se määrittelee fysikaalisen todelli-suuden erään tärkeän ominaisuuden. Ilmeisesti tämä pätee kaikkiin vastaavanlai-siin rajoituksiin nähden.

Kun klassillisella kaudella jo oli omaksuttu ilmeisen terve ja nykyaikainen asenne luonnon tutkimukseen ja kokeellinen ja teoreettinen tutkimus käsi kädessä muodostivat hyvin toimivan harmonisen kokonaisuuden, on yllättävää, että 1900-luvun alussa oli läpikäytävä niin perusteellinen ajatustapojen tarkistus. Kyllä aikai-semminkin ymmärrettiin, että fysikaalisen suureen tulee olla mitattavissa. Se oli selviö, johon ei tarvinnut kiinnittää kovin vakavaa huomiota. Se ei näyttänyt ilmaisevan mitään tärkeää fysikaalisesta todellisuudesta, niin kauan kuin lisääntyvä tieto tästä oli sopusoinnussa maailmankuvan kanssa. Ristiriitojen aiheuttamassa kriisissä oli avainajatuksena, että tähän vaatimukseen sittenkin sisältyi olennaisia fysikaali-sen todellisuuden luonteenpiirteitä, joita klassillinen maailmankuva loukkasi. Siksi se myös koettiin ja koetaan yhä fysikaalista todellisuutta rajoittavaksi.

Voimakkaimmin näyttää fysiikan mahdollisuuksia rajoittavan se, mitä olemme oppineet mittausten epätarkkuuden merkityksestä. Heisenbergin epätarkkuusperiaate ja varsinkin Bohrin komplementaarisuusperiaate antavat sen vaikutelman, ettei luonnon kaikkea todellisuutta ole mahdollista havaita havaintotekniikkamme periaatteellisen ja korjaamattoman vajavaisuuden vuoksi. Kuitenkin on aivan yhtä il-meistä kuin äsken, ettei fysiikalla ole mahdollisuutta tunkeutua tämänkään rajan taakse.

Koska vain mitattava kuuluu todellisuuteen, ei esimerkiksi paikan ja nopeuden tarkkoja arvoja lainkaan ole. Suuret ovat fysikaaliselta perusolemukseltaan epä-tarkat vastoin klassillista näkemystä. Tässä suhteessa kvanttimekaniikan käsitys suureiden luonteesta ja mahdollisista arvoista on ehdottomasti realistisempi. Koska hiukkasen olemukseen kuuluu olennaisesti määrätty paikka joka hetki, ei fysikaali-nessa todellisuudessa siis voi olla olemassa ainoatakaan hiukkasta – ei tosin oikea-oppista aaltoliikettä. Koko kysymys, onko jokin objekti hiukkanen vai aalto liikettä, onkin näin täysin metafyyminen.

Vaikka voisimmekin teoriassa pitää kiinni klassillisten ajatusten mukaisista deterministisistä laeista, epätarkkuuden huomioonottaminen johtaa joka tapaukses-sa toteamukseen, ettei fysikaalinen todellisuus ole deterministinen. Samantekevää, otammeko lähtökohdaksi juuri Heisenbergin periaatteen, kunhan vain myönnämme, ettei mittaustarkkuutta ole periaatteessa mahdollista parantaa rajattomasti. Jotta Newtonin mekaniikassa voitaisiin laskea jonkin systeemin tapahtumat etukäteen, olisi tunnettava kaikkien systeemiin kuuluvien hiukkasten paikat ja nopeudet alku-hetkellä. Mitä pitemmälle ajalle haluamme tämän laskun suorittaa, sitä tarkemmin nämä on tunnettava. Borel on laskenut, että suuruusluokkaa 10^{-100} oleva suhteelli-nen virhe kaasumolekyylien paikoissa ja nopeuksissa alkuhetkellä tekee mahdottomaksi määrätä molekyylien liikkeitä miljoonasosa sekuntia pitemmäksi ajaksi.²²

²² Havainnollistaakseen mainitsemansa luvun käsittämätöntä pienuutta Borel arvioi, että tämänsuu-ruinen muutos gravitaatiokenttään maan pinnalla aiheutuu, kun jonkin kohtuullisen kaukana olevan

Tällaisesta tarkkuudesta on mieletöntä puhuakaan, mutta sekään ei siis voisi johtaa minkään arvoisiin ennusteisiin. Determinismi on sen tähden teorian täysin metafyyssinen piirre.

Maailmankaikkeuden klassillinen kuvittelu koneeksi, joka kerran käyntiin pantuna toimii yksityiskohtiaan myöten täysin määrättyllä tavalla, on mitä suurimmassa määrin epäfysikaalista. Mitä voitaisiin tarkoittaa kaikkien sen hiukkasten paikoilla ja nopeuksilla jonakin valittuna alkuhetkenä, mikä olisi kaikkien klassillisten laskelmien välttämätön lähtökohta, kun tarkkaa paikkaa ja nopeutta ei ole, kun aika on suhteellista eikä mitään kaikkialla yhtäaikaista *nyt-hetkeä* ole ajateltavissaan ja kun myös hiukkanen itse on vain kuviteltu epäfysikaalinen käsite. Meidän on nykyisin pakko myöntää, ettemme pysty kuvaamaan yksinkertaisimmakaan systeemin tilaa fysikaalisin käsittein »riittävän tarkasti» voidaksemme ennustaa varmasti sen vastaisen kehityksen. Jokaiseen fysikaalisesti katsoen täysin määrättyyn tilaan sisältyy mahdollisuuksia moneen erilaiseen havaittavaan käyttäytymiseen. Sen tähden on eri mahdollisuuksien todennäköisyyksien ilmaiseminen parasta, mitä voidaan toivoa ennusteeksi sen tulevaisuudesta, sikäli kuin tällaisella käsitteellä on mieltä. Kvanttimekaniikan ajatustapa pitää tätä mahdollisena, ja sen antamat ennusteet ovat juuri tämän luonteisia. Tosin näinkin joudutaan eräisiin ajatusvaikeuksiin. Jotta todennäköisyydellä olisi fysikaalista merkitystä, se pitää tietenkin voida mitata. Tämä taas edellyttää, että tarkasteltavana on hyvin suuri joukko samanlaisia samassa alkutilassa olevia systeemejä tai että sama systeemi voidaan aina uudelleen saattaa täsmälleen samaan alkutilaan. Tällöin tietyn käyttäytymisen todennäköisyys olisi ainakin likimäärin sama kuin sen havaittu suhteellinen osuus kaikista tarkastelluista tapauksista. Sen sijaan yhden ainoan tietynlaisen systeemin käyttäytymisestä olisi tämän mukaan mahdotonta lausua fysikaalista ennustetta.

Epätarkkuus fysikaalisen luonnon ominaisuutena tekee edelleen luonnon yksityiskohtaisen mekanistisen ymmärtämisen mahdottomaksi, tai ainakin se kiistää tällaisen ymmärtämisen fysikaalisuuden. Kuitenkin juuri tämä oli klassillisen fysiikan tavoite. Lordi Kelviniä lainatakseni voimme ymmärtää ilmiön vain, jos voimme ajatuksissamme konstruoida sille mekaanisen mallin. Kaikki klassilliset lait kuvasivat ilmiötä siten, että ne voitiin kuvitella peräkkäisten tilanteiden ketjuksi, jossa kukin tila luonnon lain pakosta seurasi edellisestä. Koska kaikilla perusyhtälöissä käytetyillä symboleilla ja merkinnöillä oli välitön konkreettinen tulkintansa, oli kaikkien suureiden arvoja mahdollista seurata niiden avulla. Näin ilmiötä voitiin tarkkailla sen tapahtumisen pienimpiä yksityiskohtia myöten. Tämä on mekanistista ymmärtämistä. Se ilmeisesti vastaa hyvin ihmisen luonnollista ymmärtämisen tarvetta, koska se pohjimmiltaan perustuu konkreettiseen havaintomaailmaan. Luonnon epätarkkuudesta seuraa, ettei periaatteessakaan ole mahdollista todeta atomimaailman ilmiöiden yksityiskohtia. Esimerkiksi elektronien radat ja rataliike eivät kuulu fysikaaliseen todellisuuteen. Niitä ei ole olemassa. Todellisuuteen kuuluu yhtä vähän se, mitä yksityiskohdittain tapahtuu atomin elektroniverhossa, kun elektronit siinä järjestäytyvät uudelleen ja lähettävät fotonin. Kun ilmiöiden yksityiskohtia ei ole, emme myöskään voi vaatia ilmiöiden ymmärtämistä niiden avulla. Se olisi turvautumista periaatteessakin havaitsemattomiin, toisin

kiintotähden, esimerkiksi Sirkuksen, etäisyydellä 1 g:n massa siirtyy 1 cm:n verran. Heisenbergin periaatteen mukaiset epätarkkuudet ovat tähän verrattuna jättäjäismäiset.

sanoen metafyyisiin mekanismeihin.

On täysin selvää, että klassillisesta fysiikasta oli poistettava ne metafyyysiset piirteet, jotka olivat ristiriidassa fysikaalisen todellisuuden kanssa, vaikka todellisuudelle asetettava mitattavuuden vaatimus kielsikin keskeisimmän, konkreettisen ymmärtämisen mahdollisuuden. Suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan siirtymisen abstraktiin käsitemaailmaan ymmärrämme peruuttamattomaksi. Klassillista fysiikkaa realistisemman teorian luomiseksi tämä oli väistämätöntä. Abstraktinen matematiikka on ihmisen ainoa keino ymmärtää jotakin, mikä ei ole konkreettista ja havaintoon perustuvaa. Nykypäivän fyysikon on pakko korjata lordi Kelvinin antamaa ymmärryksen määritelmää. Tänään ymmärrämme ilmiön, jos meillä on matemaattinen formalismi, jonka avulla voidaan laskea oikeita ennusteita sitä koskevista mittauksista. Luonnon todellisuutta ihmisen oman havaintomaailman ulkopuolella voidaan kuvata vain abstraktisin käsittein.

Emme voi mitään sille, että ne käsitteet, jotka parhaiten edustavat luonnon ominta todellisuutta, sen suureita ja lainalaisuuksia, koetaan hyvin abstraktisiksi. Emme myöskään mahda mitään sille, että konkreettisuuteen sidottu käsityskykymme kieltäytyy hyväksymästä abstraktista luonnontodellisuutta. On todellakin kyseenalaista, onko tällaisin edellytyksin enää mahdollista odottaa fysiikalta *maailmankuvaa*.