

NEWTON DE MUNDI SYSTEMATE

Jouni Huhtanen

Sir Isaac Newton (1642–1727) esitti tutkimuksessaan *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) matemaattisesti kelvollisen selostuksen kappaleiden välisen mekanistisen voiman määrittelemiseksi. Ongelmaksi muodostui kuitenkin se, ettei hän kyennyt siirtämään tätä mallia kovin hyvin fysikaaliseen todellisuuteen, vaan joutui turvautumaan osin hypoteettisiin selityksiin. Seuraavassa tätä kysymystä tarkastellaan osana Newtonin fysiikan kehitystä ja pohditaan samalla sitä, millaisia keinoja hän käytti selvitellessään aineen ja voiman kokonaisrakenteen ongelmia.

Newton julkaisi pääteoksensa *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ensimmäisen kerran vuonna 1687. Tutkimus syntyi seitsemän- tai kahdeksantoista kuukautta kestäneen intensiivisen tutkimus- ja kirjoitustyön jälkeen. Tietävästi Newton aloitti työnsä laadinnan ystävänsä ja työtoverinsa Edmund Halley'n (1656–1742) toisen vierailun jälkeen marras- tai joulukuussa 1684 ja sai sen viimeisteltyä julkaisukuntoon huhtikuussa 1686. Tämä tiedetään siitä, että Newton lähetti kyseisen kuukauden aikana tutkimuksensa ensimmäisen kirjan (*De motu corporum liber primus*) käsikirjoituksen Royal Societyyn. Kirjoitus sisälsi ensimmäisen kirjan varsinaisen tekstiosuuden lisäksi alun kuuluisat määritelmät sekä liikelait, mutta ei esipuhetta. (Cohen 1978, 68–69.)

Principian kirjat syntyivät omina kokonaisuuksinaan ja Newton korjaili tutkimustaan huomattavan monta kertaa. Hänen Halleylle kahdeskymmenes kesäkuuta 1686 lähettämänsä kirjeen mukaan toinen kirja (*De motu corporum liber secundus*) valmistui kesällä 1685, jolloin se vaati enää puhtaaksikirjoittamista sekä muutaman kaavion lisäämistä. Samassa kirjeessä Newton mainitsi suunnitelleensa tutkimuksestaan kolmiosaisen. Viimeisen eli kolmannen osan (*De mundi systemate liber tertius*) teemana oli maailmankaikkeuden kokonaisjärjestelmä ja sen oli tarkoitus käsitellä ainakin komeetteoriaa. (Newton 1960, 437.) Tutkimuksen syntyyn vaikuttaneet yksityiskohdat ovat osin hämärän peitossa siksi, ettei Newton kommentoinut työnsä valmistumista kovin laajasti muistikirjoissaan tai kir-

jeenvaihdossaan. Lisäksi *Principian* ensimmäisen painoksen toimittajan Humphrey Newtonin tekemät muistiinpanot ovat kadonneet. Tämä tekee mahdottomaksi tietää varmasti, tekikö Newton tutkimukseensa muutoksia Halley'n esittämien korjausten perusteella.

Näistä ongelmista huolimatta *Principian* kehitystä voidaan tarkastella suhteellisen hyvin säilyneiden arkistolähteiden avulla. Newton kehitteli inertialain, kiihtyvyyden, voiman ja vastavoiman lain sekä gravitaatio-ideoita ensin ”De motu corporumissa” ja muissa Portsmouth Collectioniin sisältyvissä käsikirjoituksissaan (MS Add. 3965 ja MS Add. 3966), Cambridgen yliopiston professorina pitämässään luennoissa (MS Dd. 9.46), *Principian* käsikirjoituksessa (MS/69) sekä lopulta julkaistun tutkimuksen eri painosten oikolukuviedoksissa (Adv. b. 39.1 ja Adv. b. 39.2). Näiden tekstien syväallinen vertailu auttaa ymmärtämään, kuinka laajoja ja sisällöllisesti merkittäviä muutoksia Newton teki tutkimukseensa teoreemojen, lemموjen, korollaarien ja propositionien osalta. (Ks. Cohen 1978; Koyré & Cohen 1972.)

Tutkimuksen kokonaisrakenteen kehitys on näin ajatellen suhteellisen helposti jäljitettävissä olemassa olevien arkistolähteiden avulla. Newtonin Cambridgessa vuosina 1684 ja 1685 pitämät luennot (MS Dd. 9.46) sisältävät käsikirjoituksen ”De motu corporum, liber primus” ja Portsmouthin arkistoyksikkö (MS Add. 3990) käsikirjoituksen ”De motu corporum, liber secundus”. Tietävästi nämä kaksi luonnosta muodostivat *Principian* alkuperäisen hahmotelman. Osista jälkimmäinen käsitteli maailmanjärjestelmää ja todennäköisesti

Newton siirsi sen *Principian* alkuperäisen käsikirjoituksen kirjaksi kolme. (Cohen 1978, 110.) Tämä tarkoitti samalla sitä, että hänen täytyi luonnostella tutkimukseen uusi toinen osa viimeistään työn käsikirjoitusvaiheessa vuonna 1686. Tällaista asiakirjaa ei arkistoista kuitenkaan löydy.

Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti muutamia *Principian* kolmannen kirjan sisällöllisiä ja käsitteellisiä ongelmia. Newtonin tutkimus nojasi tunnetusti matemaattiseen ilmaisutapaan ja yritykseen löytää kaikille propositioneille täsmälliset matemaattiset perusteet. Hänen tutkimustyylilleen oli lähtökohtaisesti leimallista se, että hän pyrki tuottamaan *Principiassa* luonnosta matemaattisen järjestelmän, jonka säännöt voitiin johtaa suoraan kokemuksesta. Tämä lähtökohta tarjosi mahdollisuuden suhtautua eksaktin tieteen ongelmiin matemaattisesti ja yhdistää koetulokset ja havainnot toisiinsa. (Cohen 1983, 15–16.) Ongelmaksi muodostui kuitenkin se, että abstraktin matemaattisen ilmaisutavan tuli selittää luonnon yksinkertaiset muodot ja mukautua samalla luonnon todellisiin ilmiöihin. Tämä tarkoitti Newtonille yritystä soveltaa alun matemaattiset periaatteet luontoon ja osoittaa universaalien painovoiman todelliset tekijät käytännössä. Seuraavassa pohditaan sitä, kuinka hyvin tämä tavoite onnistui ja kuinka hyvin *Principian* kahden ensimmäisen kirjan teoreettiset lähtökohdat palvelivat loppuosan fysikaalisia tavoitteita.

PRINCIPIA MATEMAATTISENA JA FYSIKAALISENA TUTKIMUKSENA

Principian perustana oli pyrkimys johtaa ennen kaikkea matematiikan – ei niinkään tieteellisten kokeiden – avulla syvällinen käsitys maailmankaikkeudesta ja sen perustavista toiminnoista. Kokeellisesti tuotetulla havaintoaineksella oli tässä jonkinlainen alustava roolinsa, mutta perustavana lähtökohdaksi toimi ajatus matematiikan kyvystä paljastaa luonnon voimien todellinen luonne sellaisenaan. (Cohen 1983, 64.) *Principian* tieteelliset tavoitteet ja teoreettiset lähtökohdat selittivät täydellisesti työn rakennetta ja jakautumista kolmeen erilliseen osaan. Tutkimuksen kaksi ensimmäistä kirjaa olivat selvästi matemaattisia ja todistivat luonnossa vallitsevien olosuhteiden matemaattisen tasapainon, ja vasta kolmas kirja sisälsi laajan ideologisen selostuksen kokonaisjärjestelmän kehittämiseksi.

Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että Newton oli kyennyt esittämään teorian kaikkialla vallitsevan voiman konstruoinnaksi huomattavasti järjestelmänsä olleen jokseenkin yhtäpitävä luonnon kanssa. Kolmannen kirjan teoreettinen esitys gravitaation luonteesta nojasi kahden ensimmäisen osan matemaattisiin periaatteisiin, joiden mukaan aine oli massaltaan äärellinen ja siten täysin täsmällisesti määriteltävissä matematiikan keinoin. (Jammer 2000, 11.) Fysikaalisessa mielessä tämä kaksijakaisuus johti kuitenkin kahden erilaisen voimakäsitteen määrittelyyn ja lopulta pyrkimykseen mieltää nämä kaksi voimaa yhdeksi ja samaksi voimaksi. Puhuessaan kahden kappaleen keskinäisestä vetovoimasta tutkimuksensa kahdessa ensimmäisessä osassa Newton käytti johdonmukai-

sesti sentripetaalisen voiman (*vis centripetae*) käsitettä. Kyseisen käsitteen käyttöön ei sisällynyt suuria ongelmia, mutta siirtyessään tutkimuksensa kolmanteen osaan ja varsinaisen maailmanjärjestelmän kuvaukseen hän joutui ottamaan käyttöön yleisen painovoiman eli gravitaation (*vis gravitatis*) käsitteen yleistääkseen sentripetaalisen voiman vaikutuksen koskemaan maailmankaikkeuden kaikkia osatekijöitä. (Cohen 1983, 70.)

Tutkimuksen ensimmäinen osa oli huomattavan matemaattinen, mutta siinä voitiin nähdä ainakin periaatteessa jonkinlainen ideologinen yritys siirtyä puhtaasta abstraktista matematiikasta luonnon fysikaalisen tutkimuksen piiriin. Tämä tapahtui sektion yksitoista (*De motu corporum viribus centripetis se mutuo petentium*) alussa. Newton käsitteli kyseisen sektion alkuun saakka keskustaa kohti suuntautuvaa liikkumatonta vetovoimaa, mutta myönsi tällaisen liikkeen olleen tuskin koskaan mahdollinen todellisissa oloissa. Tavanomaisesti vetovoima suuntautuu kohti kappaletta (kolmannen lain mukaisesti) attraktio- ja repulsiivoimien ollessa aina vastavuoroisia. Tällöin vetovoiman alaisena oleva kappale ei ole sen enempää levossa kuin sitä vetävä kappale. Sama pätee kolmen tai sitä useamman kappaleen järjestelmälle. Yksikään kappale ei ole levossa eikä liiku luotisuoraa linjaa pitkin, vaan kiertää gravitaatiokeskusta. (Newton 1999, 561.)

Eriyisesti väite vetovoiman suuntautumisesta kohti vetävän kappaleen keskipistettä viittasi fysikaaliseen luontoon sellaisenaan. Newton piti sentripetaalista voimaa vetovoimana (*attractione*) ja katsoi sen synnyttäneen fysikaalisessa mielessä voiman sy-

käyksellisyyden (*impulsus*). Hänen tarkoituksensa ei ollut tästä huolimatta täysin selvä. Fysikaalinen kuvaustapa tuli esiin käsitteiden valinnassa. Puheena olevassa sektiossa Newton vaihtoi sentripetaalisen voiman käsitteen attraktion käsitteeseen hieinan yllättäen ilmeisesti siksi, että katsoi jälkimmäisen olleen matematiikkaan perehtyneen lukijan helpommin ymmärrettävissä. (Newton 1999, 565.) Ensimmäisen kirjan kymmenessä ensimmäisessä sektiossa hän puolestaan käytti sentripetaalisen voiman käsitettä kaiketi siitä syystä, että katsoi käsitteen kuvaavan suhteellisen helposti yksittäisen kappaleen pyrkimystä kohti voimakeskusta. Yhdennestätoista sektioista eteenpäin ongelmaksi muodostui kuitenkin se, ettei puhe ollut enää yhdestä yksittäisestä kappaleesta ja sen liikevoimasta, vaan kahden (tai useamman) kappaleen välisestä vuorovaikutuksesta. Monen kappaleen järjestelmässä ongelmaksi muodostui vaikeus hahmottaa voiman todellinen keskus. Kukin kappale muodosti oman voimakeskukseensa ja toimi keskipisteenä muille kappaleille. Jokainen yksittäinen voima suuntautui pikemminkin muihin kappaleisiin kuin yhteen yksittäiseen keskukseen. Tässä tilanteessa sentripetaalisen voiman käsite kävi riittämättömäksi, mutta täysin selvää ei ollut se, oliko kysymys todellisesta käsitteellisestä siirtymästä fysikaaliseen maailmakuvaan. Newton käytti attraktion käsitettä lähinnä sentripetaalisen voiman yleistyksenä kuvattaessaan useamman kuin yhden voimakeskuksen ominaisuuksia. (Cohen 1983, 73.)

Principian teoreettinen rakenne tuntui vaativan hillittyä siirtymää matemaattisesta ilmaisutavasta fysikaaliseen. Omien sanojensa mukaan Newton käytti attraktion ja

impulssin kaltaisia käsitteitä vaihtoehtoisesti ja osin umpimähkäisesti kuvattaessaan kohhti keskustaa hakeutuvaa sentripetaalista voimaa. Varsinkin ensimmäisessä kirjassa tämä voima määräytyi pääosin matemaattisesta lähtökohdasta sisältämättä varsinaista fysikaalista tulkintaa voimalle. Attraktion käsitteen tarkoituksena oli kuvata kaikkia kahden tai useamman kappaleen välisiä voimasuhteita riippumatta siitä, pyrkikö kappale kohti toista kappaletta vai työnsikö se tätä pois luotaan. Käsitteen alaan sisältyivät lisäksi kaikenlaiset eetterin, ilman tai muun väliaineen (medium) aiheuttamat muutokset kappaleen liikesuunnassa. Samansuuntainen yleinen merkitys oli impulssin käsitteellä. Sen tarkoituksena oli kuvata voiman kvantiteettia matemaattisena tosiasiana vaatimatta kuvaukselle varsinaisia fysikaalisia ominaisuuksia. (Cohen 1983, 74.)

Principian käsitteistöä kohtaan esitetty kritiikki juontaa juurensa ainakin osin siitä, että tutkimusta on tavallisesti luettu katkelmina sieltä täältä jäsentämättä sitä kokonaisuudessaan *a capite ad calcem*. Newtonilla saattoi olla ajatuksena siirtyä varsinkin tutkimuksensa toisessa osassa tarkempaan fysikaaliseen kuvaustapaan, mutta varsinaisesti tämän siirtymän voi havaita vasta tutkimuksen kolmannessa osassa. Kahden ensimmäisen kirjan matemaattiset väittämät alustavat kolmannen kirjan fysikaalista maailmankuvaa ja tarjoavat perustavanlaatuiset ehdot loppuosan astronomisille väittämille. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että Newtonin matemaattinen konstruktio yhdessä yleisesti määritellyn attraktion käsitteen kanssa saattoi johtaa lopulta ainakin

analogisesti todellisen maailman kuvaukseen. (Jammer 1962, 137–138.)

Keskeiseksi ongelmaksi muodostui tällöin kysymys siitä, mikä saattoi olla syynä veto-voimalle. Newtonin tunnetun selityksen mukaan hän oli mielestään osoittanut täysin selvästi attraktion olevan sama voima kuin gravitaation. Kyseinen voima päti kaikissa tilanteissa kappaleen pudotessa kohti Maata tai liikkeessä painovoiman vaikutuksesta avaruudessa. Maailmankaikkeudessa vaikuttava voima ”tuplasi” (*duplicate*) kappaleiden välisen voiman ja osoitti fysikaalisen voiman toimivan vastavuoroisesti kahden kappaleen välillä. (Cohen 1983, 75.) Tämä selitys antoi Newtonille mahdollisuuden vetäytyä positivistiseen näkökulmaan. Hän oli löytänyt maailmankaikkeudelle jonkinlaisen selityksen, mutta myönsi tutkimuksensa loppuluvussa, ettei ollut vielä löytänyt sille todellista fysikaalista muotoilua. Newtonin aksiomaattinen mekaniikka toimi kuitenkin hyvin käytännössä. Hän johti ensin kaksi tai kolme yleistä liikelakia tai fysikaalista periaatetta ja sovelsi tämän jälkeen löytämiään lakeja maailmankaikkeuden yleisten ilmiöiden ja kokonaisrakenteen määrittelyyn. (Jammer 1993, 97–98.)

SENTRIPETAALISESTA VOIMASTA GRAVITAATIOON

Principian kolmiosaista rakennetta selittää parhaiten Newtonin pyrkimys esittää ensin kahdessa ensimmäisessä kirjassa matemaattiset perusteet luonnonlakien todentamiseksi ja kolmannessa pyrkimys siirtää nämä lait käytäntöön ja osoittaa niiden todellinen fysikaalinen toimivuus luonnossa. *Principian* toinen kirja sisältää perustavanlaatui-

sia selostuksia voiman ja väliaineen vastuksen luonteesta, mutta Newton oli tiettävästi tietoinen näiden väitteiden vaikeaselkoisuudesta ja pyrki osin tästä syystä johtuen esittämään kolmannessa kirjassa konkreettisia käsityksiä kappaleiden vastuksesta ja aineen tiheydestä. (Cohen 1983, 75.) *Principian* perimmäisenä tavoitteena oli osoittaa luonnon matemaattiset periaatteet, mutta tämä vaatimus tuotti Newtonille pyrkimyksen tehdä tutkimuksesta mahdollisimman yhdenmukainen.

Tämä yhdenmukaisuus muodostui lopulta *Principian* keskeisimmäksi tavoitteeksi ja konkretisoitui tutkimuksen kolmannessa kirjassa. Newtonin mukaan hänen oman aikakautensa fyysikot olivat pyrkineet oikeuttamaan kartesiolaisen pyörreteorian (vortex) tai viitanneet planeettojen liikkeitä tutkiessaan Borellin ja Hooken tavoin yksittäisiin impulsseihin kykenemättä osoittamaan kokonaisjärjestelmän toimivuutta käytännössä. Newton ei uskonut kartesiolaisiin ideoihin ja hänelle impulssien ja vastaavien määrittely oli ainoastaan mekaniikan ensimmäisen lain (*inertia*) kaltainen teoreettinen lähtökohta. *Principian* perimmäisenä tavoitteena oli osoittaa kappaleiden todellinen kvantiteetti ja perustavat liikeominaisuudet matemaattisesti. Perustana toimi käsitys sentripetaalisen voiman yleisluonteisuudesta, jolloin esimerkiksi kaikki Aurinkoa kohti pyrkivät kappaleet olivat aurinkokeskisiä (*circumsolares*) ja Jupiteria kohti pyrkivät kappaleet jupiterkeskisiä (*circumjoviales*). (Newton 1999, 802–803).

Kyseinen lähtökohta tarjosi perustavanlaatuisen edellytyksen gravitaation määrittelylle. Kolmannen kirjan tavoitteena oli löytää todellinen fysikaalinen selitys kaikkien

kappaleiden taustalla vaikuttavalle yhtenäiselle voimalle. Tutkimuksen toisen kirjan ongelmana tuntui olleen samansuuntainen rajanveto matemaattisten ja fysikaalisten argumenttien osalta kuin ensimmäisessä kirjassa. Tutkimuksensa toisen kirjan propositiossa XXIII Newton tarkasteli Boylen lakia ja väitti kaasun (tai nesteen) paineen olevan käänteinen sen määrään. (Jammer 1962, 118.) Hän oletti partikkelien muodostavan elastisen, pieneen tilaan puristuvan nesteen ja tarkasteli yksittäisten partikkelien keskinäistä repulsiota sekä kykyä vastustaa toinen toisiaan. Newtonin mukaan Boylen laki on riittävä ja välttämätön ehto osoitettaessa partikkelien kyky vaihdella käänteisesti suhteessa toisiinsa. Tavoilleen uskollisena hän esitti lain perussisällön matemaattisesti, mutta väitti samalla, että oli käsitellyt sitä ainoastaan partikkelienvälisen voiman fysikaalisena mallina antamatta sille todellista asemaa luonnossa. Tämän hypoteettisen mallin tarkoituksena ei ollut todistaa luonnossa vallitsevien voimien olemassaoloa, vaan tarjota fyysikoille tilaisuus keskustella aiheesta. (Newton 1999, 698–699.)

Toinen *Principian* toisessa kirjassa esiintyvä teorettinen malli maailmankaikkeuden kokonaisrakenteen selvittämiseksi koski Keplerin kolmea liikelakia. Näiden lakien etuna oli se, että Newton saattoi muunnella niitä suhteellisen helposti pohtiessaan maailmankaikkeuden kokonaisrakenteen yksityiskohtia. Ongelmaksi muodostui kuitenkin se, että Keplerin ideat koskivat yhden kappaleen ominaisuuksia tai kahden kappaleen keskinäistä liikettä. Näin ajatellen lakien avulla oli vaikea määrittellä universaalien vetovoiman todellinen luonne. (Jammer

1962, 118.) Boylen laissa ei tätä ongelmaa ollut. Laki osoitti ainehiukkasten repulsiivoimat kauttaaltaan ja salli jokaisen fysikaalisessa tilassa vaikuttavan ainehiukkasen käyttäytyä samalla tavalla. Newton tiesi, ettei hänen yksinkertainen Keplerin lakeihin nojannut järjestelmänsä voinut olla yhtäläinen luonnon kanssa. Maailmankaikkeuden monimutkaisen järjestelmän paljastaminen vaati kokeellista tutkimusta ja todellisia havaintoja maailmankaikkeuden tilasta. Boylen laki oli hyvä lähtökohta tälle, mutta se ei kyennyt ilmaisemaan täysin selvästi (eikä varsinkaan matemaattisesti) luonnon todellista luonnetta sikäli kuin malliin ei lisätty voiman etäisyyksille jonkinlaisia raja-arvoja. (Cohen 1983, 77.)

Ongelmana oli ennen kaikkea se, että Newton hyväksyi korpuskularistisen teorian lähes sellaisenaan vaatimatta sille juuri minäänlaista teoreettista tai kokeellista oikeuttamista. Tämä saattoi olla yllättävää huomioiden sen, etteivät kaikki Newtonin aikakauden tieteilijät olleet korpuskularisteja tai atomisteja. Väite partikkeleista ja niiden keskusvoimista oli Newtonin aikana radikaali ja heikosti vahvistettu. Lisäongelmia tuotti se, ettei tieteenharjoittajien keskuudessa vallinnut täydellistä yksimielisyyttä partikkeleille mahdollisesti kuuluvien voimien luonteesta ja kantamien pituuksista. (Jammer 2000, 122–123.) Kaiken tämän lisäksi ei ollut täyttä varmuutta siitä, saattoiko kyseinen staattinen malli kuvata luontoa totuudenmukaisesti. Newtonin teoriaa oli helppo vastustaa siksi, ettei hän ollut kyennyt esittämään sen vakuudeksi täysin tyydyttäviä koetuloksia. Boylen laki tuntui toimivan erittäin hyvin kaasumaisten ja nestemäisten aineiden kohdalla, mutta sen siir-

tämisestä maailmankaikkeuden mittakaavaan ei ollut minkäänlaisia takeita. Soveltaessaan mallia maailmankaikkeuden tutkimukseen Newton ei koskaan saavuttanut sille riittävää matemaattista tarkkuutta tai fysikaalista täydellisyyttä. (Cohen 1983, 77–78.) Malli tuntui jäävän selittäväksi hypoteesiksi jopa hänelle itselleen.

Varsinkin *Principian* kolmannen kirjan fysikaalinen ote tuntui karttavan kaikenlaisia teoreettisia malleja. Osan tunnetuin ongelma liittyi Newtonin yrityksiin kehittää asianmukainen teoria Kuun häiriöliikkeen todentamiseksi. Newton ei ollut tunnetusti koskaan täysin tyytyväinen kuuteoriaansa ja palasi sen ongelmiin kerta toisensa jälkeen. Tämä voidaan nähdä muun muassa hänen yrityksissään korjata Kuun radan Maata lähinnä olevan pisteen (perigee) määrittelyä. Ongelma tuli esiin tutkimuksen ensimmäisen painoksen kolmannessa kirjassa vain lyhyessä Scholiumissa sekä propositioissa XXXV. Newton korjasi kohtaa toisessa painoksessa (1713) laatimalla Scholiumista huomattavan paljon laajemman ja kehittämällä siinä gravitaatioteoriaa huomattavan paljon monipuolisemmin Kuun häiriöliikkeen todellisen luonteen paljastamiseksi. Tutkimuksensa kolmannessa painoksessa (1726) hän lisäsi kohtaan uutta materiaalia, mutta oli edelleen tyytymätön häiriöliikkeen tematisointiin. (Newton 1999, 867–874.)

Toisen keskeisen ongelman muodosti kolmannessa kirjassa tapahtunut käsitteellinen siirtymä attraktion käsitteestä gravitaation käsitteeseen. Newton viittasi kolmannessa kirjassa muutaman kerran attraktioon, mutta ei käyttänyt käsitettä yleisesti planeettateoriassaan tai kuvatessaan esimerkiksi vuoro-

vesien vaihtelua kuuteoriaansa yhteydessä. Tosiasiassa hän pyrki pitämään luomansa matemaattisen mallin ja fysikaalisen todellisuuden toisistaan erillään samalla tavalla kuin kahdessa ensimmäisessä kirjassa. Kolmannessa kirjassa laajemmin esiin tulevat painon (*gravitas*) ja painovoiman (*vis gravitatis*) käsitteet olivat luonteeltaan fysikaalisia, mutta attraktion käsite oli Newtonin omien sanojen mukaan ennen kaikkea matemaattinen ja sellaisena tarkoituksenmukainen ainoastaan tutkimuksen kahdessa ensimmäisessä kirjassa. (Cohen 1983, 82.)

Attraktion (subst., *attractio*; inf., *attractive*) käsite esiintyi *Principiassa* yli kolmesataa kertaa, mutta näistä vain kahdeksantoista tuli esiin kolmannessa kirjassa. Tällöinkin Newton käytti käsitettä lähinnä vain kuvaatessaan sähköistä tai magneettista vetovoimaa. Ainoastaan kaksi mainintaa liittyi kommentaattorien kuvaukseen, mutta nämä eivät olleet kokonaisuuden suhteen kovin merkittäviä. Jonkinlaista fysikaalista merkitystä saattoi nähdä ainoastaan korollarissa yksi (propositio V), jossa Newton viittasi Jupiterin kuiden vetovoimaan, korollarissa kolme, jossa hän puhui Jupiterin ja Saturnuksen läheisyydestä ja viittasi niiden keskinäiseen vetovoimaan sekä propositioissa VI, jossa hän puhui Jupiterin satelliittien vetovoiman epätasaisuudesta. (Jammer 2000, 119–120.) Muissa tapauksissa hän käytti kolmannessa kirjassa johdonmukaisesti gravitaation (subst., *gravitas*, *gravitatio*; inf., *gravitare*) käsitettä. Gravitaation käsite liittyi taivaanmekaniikan fysikaaliseen tutkimukseen eikä sillä ollut sijaa työn ensimmäisessä osassa. (Cohen 1983, 83.)

Gravitaation käsite soveltui hyvin kuvaamaan yleisesti Jupiterin, Saturnuksen ja

Maan sekä niiden kiertolaisten liikettä maailmankaikkeudessa. Newtonin mukaan kaikki kappaleet olivat perusominaisuuksiltaan toistensa kaltaisia ja keskeisvoima veti niitä tasaisesti puoleensa. Planeetat vetivät puoleensa kuitaan ja Aurinko planeettoja. Tällöin maailmankaikkeudessa täytyi olla jokin yksi yhtenäinen voima, joka vaikutti kaikkiin planeettoihin yleisesti. Newtonin kolmannen lain mukaan tämä vetovoima oli molemminpuolinen, jolloin kaikki planeetat pyrkivät vetämään kierolaisiaan puoleensa ja kiertolaiset puolestaan planeettoja puoleensa. (Newton 1999, 806.) Lisäksi kunkin planeetan etäisyys keskukseen määräytyi käänteisten neliöiden lain mukaan siten, että samanpainoiset kappaleet sijoittuivat aina samalle etäisyydelle keskuksesta. Kappaleet pyrkivät toisiaan kohti suhteellisten massojensa mukaisesti. (Cohen 1983, 88–89.)

GRAVITAATIO NEWTONIN JÄRJESTELMÄN PERUSTANA

Principian kolmas kirja erosi tyyliltään kahdesta ensimmäisestä siinä, ettei Newton selostanut osassa luonnonmekaniikkansa kaikkia osatekijöitä kovin täsmällisesti, vaan pyrki esittämään pikemminkin lyhennelmän tai yhteenvedon rationaalisen mekaniikkansa ja maailmanjärjestelmänsä pääkohdista. Lukija saattoi saada selvän käsityksen Newtonin tarkoituksista lukiella ensimmäisen kirjan alussa olevat määritelmät (*Definitiones*) ja liikelait (*Axiomata sive leges motus*) sekä lisäksi kirjan kolme ensimmäistä sektiota. Tämän jälkeen hän saattoi siirtyä suoraan kolmannen kirjaan ja edetä järjestyksessä alun

menetelmällisistä säännöistä (*Regulae philosophandi*) maailmanjärjestelmää selittäviin ilmiöihin (*Phaenomena*), planeettaliikkeiden kuvauksiin, vuorovesiteoriaan, Kuun häiriöliikkeen analyysiin ja lopulta tutkimuksen päättäviin komeettojen ratakuvauksiin saakka. (Cohen 1999, 195.)

Principian kolmas kirja muodosti itsessään suhteellisen selkeän kokonaisuuden osin siksi, että se oli jonkin verran väljemmin laadittu kuin työn kaksi ensimmäistä kirjaa ja lisäksi sen alkuun sisältyi selvä menetelmällinen johdanto. *Principian* kaksi ensimmäistä kirjaa olivat tyyliltään raskaita ja työläitä myös matemaattisilta taidoiltaan kyvykkäille lukijoille. Ilmeisesti tämän tosiasian vastapainoksi Newton oli laatinut kolmannesta kirjasta alussa mainitun version ”De mundi systemate, liber Isaaci Newtoni” (MS Add. 3990) pyrkimyksensä julkaista se yleistajuisena selostuksena maailmankaikkeuden kokonaisjärjestelmästä. Asiaa on syytä tarkastella gravitaatiokäsitteen kehityksen takia. Kyseinen versio julkaistiin Newtonin kuoleman jälkeen latinaksi otsikolla *De mundi systemate liber* (1728) ja englanniksi otsikolla *A Treatise of the System of the World* (1728). Lisäksi *Principian* ensimmäisen englanninkielisen käännöksen laatinut Gresham Collegen lyhytaikainen luennoitsija Andrew Motte (1696–1734) julkaisi sen käännöksensä liitteenä (ks. Newton 1962, 549–626).

A Treatisen alussa Newton mainitsi laati-neensa työn siksi, että se saattoi olla muodoltaan varsinaista tutkimusta yleistajuisempi ja siten laajemman lukijakunnan omaksuttavissa (Newton 1731, v–vi). Tekstejä verrattaessa käy selväksi, ettei vuoden 1728 työ sisältänyt juuri minkäänlaista

mainintaa universaalista gravitaatiosta. *A Treatisen* toisessa luvussa Newton selosti lyhyesti planeettojen pysymistä liikeradoillaan perustaen käsityksensä lähinnä Keplerin ja Descartesin impulssin ja attraktion käsitteisiin. Kyseisen liikkeen ymmärtäminen vaati lähtökohtaisesti ensimmäisen liikelain (*inertia*) hyväksymistä voiman perustaksi, mutta Newton pyrki löytämään kappaleen liikkeelle todellisen kvantitatiivisen selityksen. Välttääkseen kaikenlaiset epäselvyydet hän kutsui voimaa sentripetaaliseksi ja pyrki laajentamaan sen vaikutuksen koskemaan kaikenlaista keskihakuisia voimaa maailmassa. (Cohen 1983, 93.) Tämän kehittelyn lähtökohtana oli Newtonin oman kielenkäytön mukaisesti matemaattinen menetelmä (*in a mathematical way*), mutta ei samanlainen matemaattinen täsmällinen esitystapa kuin *Principian* kolmannessa kirjassa. (Newton 1731, 5.)

A Treatisessa Newton käytti edellä mainitua matemaattiseksi kutsumaansa menetelmää tutkiakseen liikkuvien kappaleiden vaikuttavat voimat, mutta *Principian* kolmannessa kirjassa hän kääntyi kokonaisvaltaisemmin matemaattiseen ilmaisutapaan saavuttaakseen syvällisemmän käsityksen maailmankaikkeuden perustavista rakenteista. Samalla hän muutti *A Treatiselle* ominaiset proosakappaleet numeroiduiksi propositioiksi, korollaareiksi ja lemmoiksi ja sovitti näiden lomaan lyhyitä scholiumkatkelmia samaan tapaan kuin kahdessa ensimmäisessä kirjassa. Omien sanojensa mukaan hän oli pyrkinyt *A Treatisessa* selvittämään kappaleiden perimmäiset liikeominaisuudet ja kvantiteetit siltä osin kuin keskeisvoima saattoi selittää nämä tekijät. *Principian* kolmannessa kirjassa hän käänsi

tämän ydinidean matemaattiseksi propositioiksi ja saattoi siten puhutella alan todellisia asiantuntijoita. (Cohen 1983, 94.)

Perustavanlaatuisesti eroksi muodostui lopulta se, että Newton käytti *A Treatisessa* ennen kaikkea sentripetaalisen voiman käsitettä kuvatessaan planeettojen pyrkimystä pysyä liikeradoillaan (luku 3) ja puhui gravitaatiosta ainoastaan Maan lähelle pyrkivien kappaleiden kohdalla. Hän painotti sentripetaalisen voiman painavan kappaleita kohti Jupiteria, Maata ja muita planeettoja ja oletti näin ymmärretyn voiman vähenevän etäisyyden neliöiden mukaisesti (luku 6). Jonkinlaisen ongelman muodosti kuitenkin se, että selostaessaan planeettojen kiertolaisten voimasuhteita hän ei käyttänyt sentripetaalisen voiman käsitettä, vaan korvasi sen attraktion käsitteellä. Tutkimus ei ollut tältä osin kovin johdonmukainen. Esimerkiksi luvuissa 21 ja 22 hän pohti pienten kappaleiden keskinäisiä voimia, mutta kuvasi näitä voimia toisinaan veto voiman (*attract*) ja toisinaan molemminpuolisen vetovoiman (*mutual attraction*) käsitteellä. (Newton 1731, 37–40.)

Newtonin pyrkimys siirtyä *Principian* ensimmäisen ja toisen kirjan mukaisesta matemaattisesta selitystavasta todellisen fyysikaalisen maailman kuvaukseen ei toteutunut *A Treatisessa* samassa laajuudessa kuin *Principian* kolmannessa kirjassa. Hän pyrki löytämään kummassakin tutkimuksessaan luonnon selitykseksi todellisen universaalisen voiman, mutta keskeisvoimia kuvatessaan käytti ensin mainitussa suhteellisen neutraalia attraktion käsitettä viittaamatta juuri gravitaatioon. Kun hän vuoden 1685 tienoilla muotoili *A Treatisesta* päätteoksensa kolmannen kirjan, ilmeisesti hän tuolloin

ajatteli gravitaation tarjoavan konkreettisen positiivisen ilmaisen luonnon muodoille. Gravitaation käsitteestä muodostui näin ajatellen Newtonin mekaniikan keskeisin ilmaus, mutta täydellisessä kriittisessä muodossaan se tuli esiin ainoastaan *Principiasa*. Tutkimuksen ongelmana ei ollut niinkään käsitteellinen sekavuus, vaan pikemminkin se, että Newton joutui turvautumaan paikoin hypoteettisiin selityksiin olettaessaan gravitaation vaikuttavan kaikkien kappaleiden välillä.

Lähteet

Newtonin käsikirjoitukset

The Portsmouth Collection [culd.-lib.cam.ac.uk/collections/newton]

MS Add. 3965: Papers Connected with the Principia (most holograph) (1665–1727). Physical Location: Cambridge University Library.

MS Add. 3966: Papers Connected with the Principia on Lunar Theory (1665–1727). Physical Location: Cambridge University Library.

MS Add. 3990: De motu corporum liber secundus, Draft of 'De mundi Systemate' (c. 1687, printed in 1731). Physical Location: Cambridge University Library.

Adv. b. 39.1: A copy of the first edition of the Principia, interleaved with notes in Newton's hand – among the leaves inserted is the preface to the third edition. Physical Location: Cambridge University Library.

Adv. b. 39.2: A copy of the second edition of the Principia, interleaved with notes and

additions in Newton's hand. Physical Location: Cambridge University Library.

MS Dd. 9.46: Lectures on mechanics, De motu corporum (1684–1685). Physical Location: Cambridge University Library.

MS/69: The Manuscript of Newton's Philosophie Naturalis Principia Mathematica (1686). Physical Location: The Royal Society.

Kirjallisuus

Cohen, I. Bernard (1971/1978): Introduction to Newton's 'Principia'. Cambridge, London and Melbourne: Cambridge University Press.

Cohen, I. Bernard (1980/1983): The Newtonian Revolution. With Illustrations of the Transformation of Scientific Ideas. Cambridge: Cambridge University Press.

Cohen, I. Bernard (1999): "A Guide to Newton's Principia". In Isaac Newton, The Principia. Mathematical Principles of Natural Philosophy. A New Translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman. Berkeley, Los Angeles and London: University of California Press, pp. 1–370.

Jammer, Max (1957/1962): Concepts of Force. A Study in the Foundations of Dynamics. New York: Harper & Row.

Jammer, Max (1954/1993): Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics. Third, Enlarged Edition. Foreword by Albert Einstein. New York: Dover Publications, Inc.

Jammer, Max (2000): Concepts of Mass. In Contemporary Physics and Philosophy. Princeton (N. J.): Princeton University Press.

Koyré, Alexandre & Cohen, I. Bernard (1972): Isaac Newton's *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. The Third Edition (1726) with Variant Readings. Assembled and Edited by Alexandre Koyré and I. Bernard Cohen with the Assistance of Anne Whitman. 2 Volumes. Cambridge and London: Cambridge University Press / Cambridge (Mass.): Harvard University Press.

Newton, Isaac (1731): A Treatise of the System of the World. Translated into English. The Second Edition. London: F. Fayram.

Newton, Isaac (1960): The Correspondence of Isaac Newton. Volume II (1676–1687). Edited by H. W. Turnbull. Cambridge: Cambridge University Press.

Newton, Isaac (1687/1962): Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World. Volume One: The Motion of Bodies. Volume Two: The System of the World. Translated into English by Andrew Motte in 1729. The Translations Revised, and Supplied with an Historical and Explanatory Appendix by Florian Cajori [and Russell T. Crawford]. Berkeley and Los Angeles: University of California Press.

Newton, Isaac (1726/1999): The Principia. Mathematical Principles of Natural Philosophy. A New Translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman. Berkeley, Los Angeles and London: University of California Press.