



**TURUN
YLIOPISTO**

Ajatuskokeet luonnontieteiden opetuksen kontekstissa

Systemaattinen kirjallisuuskatsaus

Kasvatustiede/Opettajankoulutuslaitos
pro gradu -tutkielma

Laatija:
Santeri Saarivirta

30.4.2024
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Oppiaine: Kasvatustiede/Opettajankoulutuslaitos

Tekijä: Santeri Saarivirta

Otsikko: Ajatuskokeet luonnontieteiden opetuksen kontekstissa

Ohjaaja(t): professori Marjaana Veermans

Sivumäärä: 39 sivua

Päivämäärä: 30.4.2024

Ajatuskokeet ovat olleet merkittävä tekijä luonnontieteiden kehityksessä. Ajatuskokeita voidaan luokitella niiden luonteen perusteella, mutta konsensusmääritelmää ajatuskokeen käsitteelle ei vielä ole. Ajatuskokeet ovat potentiaalinen opetusmenetelmä luonnontieteiden opetukseen, vaikka niiden opetuskäyttö ei olekaan vakiintunutta.

Tutkielman tarkoituksena oli selvittää, miten ajatuskokeiden käyttöä luonnontieteiden opetuksen kontekstissa on tutkittu empiirisesti. Menetelmäksi valittiin systemaattinen kirjallisuuskatsaus. Aineisto haettiin neljästä kansainvälisestä kasvatustieteiden keskeisimmästä tietokannasta ja Turun yliopiston kirjaston tietokannasta. Käytännön seulan ja menetelmällisen seulan jälkeen tarkasteltavaksi hyväksyttiin 16 ajatuskokeita luonnontieteiden opetuksen kontekstissa koskevaa empiiristä tutkimusta. Kerätty aineisto analysoitiin käyttäen aineistolähtöistä sisällönanalyysia.

Ajatuskokeita luonnontieteiden opetuksessa on tutkittu aineiston perusteella ainoastaan fysiikan näkökulmasta. Tutkimusartikkelit jaettiin ajatuskokeen roolin pohjalta kahteen yläluokkaan. Ensimmäiseen yläluokkaan kuuluivat tutkimukset, joissa osallistujat suorittivat annettuja konsensusajatuskokeita tai niistä johdettuja tehtäviä. Annettujen konsensusajatuskokeiden teoriapohjina toimivat suhteellisuusteoria, kvanttimekaniikka ja klassinen mekaniikka. Toisessa yläluokassa olivat tutkimukset, joissa tarkasteltiin osallistujien luomia ajatuskokeita ongelmanratkaisutehtävien aikana.

Annetuilla konsensusajatuskokeilla oli pääsääntöisesti positiiviset oppimisvaikutukset, mutta mahdollisia ongelma-kohtia löytyi. Osallistujien luomista ajatuskokeista saatiin tietoa ajatuskokeiden tavoitteista, piirteistä ja niihin käytetyistä resursseista. Lisäksi aineistosta nousi esille kollaboratiiviset ajatuskokeet sekä ajatuskokeiden ja empiiristen kokeiden vastavuoroisuus. Akateemisella kokemuksella vaikutti myös olevan merkitystä ajatuskoe-prosessin suoritukseen.

Katsaus osoitti luonnontieteellisten ajatuskokeiden opetuskäytön potentiaalin, mutta myös aihealueen tutkimuksen vähäisyyden ja keskittyneisyyden.

Avainsanat: ajatuskoe, luonnontieteet, opetus, kirjallisuuskatsaus

Sisällysluettelo

1	Johdanto	5
1.1	Ajatuskokeen määritelmä	5
1.2	Ajatuskokeiden rakenne ja erityyppiset ajatuskokeet	8
1.3	Ajatuskokeet osana luonnontieteitä	9
1.4	Ajatuskokeet opetuksessa	10
1.4.1	Hyödyt opetuksessa	11
1.4.2	Ajatuskokeiden opetuskäytön mahdolliset ongelmat	12
1.4.3	Ajatuskoeprosessien resurssit	13
1.4.4	Oppilaat ajatuskokeiden suorittajina	14
2	Tutkimuskysymykset	16
3	Menetelmä	17
3.1	Finkin malli	17
3.2	Aineiston keruu	18
3.3	Aineiston analyysi	21
3.4	Tutkimusten luokittelu	21
4	Tulokset	27
4.1	Ajatuskokeiden käyttö luonnontieteiden opetuksen kontekstissa	27
4.2	Hyödynnetyt ajatuskokeet ja niiden avulla saavutetut oppimistulokset	27
4.2.1	Suhteellisuusteoreettiset ajatuskokeet	27
4.2.2	Kvanttimekaaniset ajatuskokeet	28
4.2.3	Klassisen mekaniikan ajatuskokeet	29
4.3	Luonnontieteiden opetuksen kontekstissa luodut ajatuskokeet	30
4.3.1	Luotujen ajatuskokeiden piirteet	30
4.3.2	Luotujen ajatuskokeiden resurssit	31
4.3.3	Kollaboratiiviset ajatuskokeet	32
4.3.4	Ajatuskokeiden ja empiirisen kokeen vastavuoroisuus	33
4.4	Luotujen ajatuskokeiden syyt ja tavoitteet	34
4.5	Akateemisen kokemuksen vaikutus ajatuskoeprosesseihin	34
4.5.1	Maisterivaiheen opiskelijat, tohtorikoulutettavat ja valmistuneet	35
4.5.2	Kandidaattivaiheen opiskelijat ja lukiolaiset	35
5	Pohdinta	37

5.1	Luotettavuus ja tutkimusetiikka	41
5.2	Jatkotutkimusehdotukset	42
	Lähteet	44
	Liitteet	49
	Liite 1. Einsteinin hissi (yksinkertaistettu)	49
	Liite 2. Einsteinin juna (yksinkertaistettu)	50
	Liite 3. Schrödingerin kissa (yksinkertaistettu)	51
	Liite 4. Kaksoisrakoajatuskoe (yksinkertaistettu)	52
	Liite 5. Heisenbergin mikroskooppi (yksinkertaistettu)	54
	Liite 6. Newtonin kanuuna (yksinkertaistettu)	55

1 Johdanto

Monet ovat ainakin joskus olleet siinä uskossa, että painavat kappaleet putoavat kevyitä nopeammin. Arkikokemuksetkin saattavat tätä tukea, sillä putoaahan karkki maahan nopeammin kuin paperi, johon se on kääritty. Todellisuudessa putoamisnopeuksien ero johtuu ilmanvastuksesta eikä kappaleiden massojen erosta. Käsitteiden virheellisyyden ja oikean vastauksen osoittaa kuitenkin erinomaisesti ”Galileon putoavat kappaleet”-ajatuskoe, jota havainnollistetaan seuraavaksi.

Kuvitellaan kaksi erimassaista kappaletta ja oletetaan, että raskas kappale putoaa nopeammin kuin kevyt. Ilmanvastusta ei huomioida. Yhdistetään kappaleet toisiinsa narulla ja pudotetaan ne yhtä aikaa. Koska systeemi on nyt painavampi, tulisi kummankin kappaleen pudota nopeammin yhdessä kuin yksinään. Toisaalta kevyen kappaleen tulisi myös hidastaa raskasta kappaletta, jolloin kappaleiden yhdistetty nopeus olisikin pienempi. Nämä kaksi loogista päätelmää ovat keskenään ristiriidassa, joten kaikkien kappaleiden on pudottava samalla nopeudella niiden massan suuruudesta riippumatta. (Galilei 1638/2013, 62–63.) Tämä on myöhemmin todistettu myös kokeellisesti tyhjiössä, jossa ilmanvastusta ei ole (Entress 2019).

Ajatuskokeita onkin hyödynnetty monipuolisesti eri tieteenaloilla kuten fysiikassa, oikeustieteessä, tietojenkäsittelytieteessä ja filosofiassa (Moue, Masavetas & Karayianni 2006). Niillä on pitkä perinne varsinkin fysiikassa ja filosofiassa. Ilman ajatuskokeita tieteellinen vallankumous, suhteellisuusteoria ja kvanttimekaniikka olisivat huomattavasti köyhempiä tai niitä ei mahdollisesti olisi olemassa ollenkaan (Brown 2006). Hyvin todennäköisesti jokainen meistä, on jossain vaiheessa elämäänsä törmännyt ajatuskokeeseen tavalla tai toisella, oli kyse sitten eettisistä pohdinnoista tai Galilein ja Einsteinin kaltaisten meritoituneiden fyysikoiden ajatuksista.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää ajatuskokeiden käyttöä luonnontieteiden opetuksen kontekstissa. Tarkastellaan seuraavaksi ajatuskokeiden määritelmää, minkä jälkeen siirrytään niiden käyttöön luonnontieteiden ja opetuksen kontekstissa.

1.1 Ajatuskokeen määritelmä

Ajatuskokeita on käsitelty usean eri tieteenalan kirjallisuudessa, mutta konsensusta ajatuskokeen tarkasta määritelmästä ei ole vielä kukaan saavutettu (Bancong & Song 2020a). Kaikki eivät usko ajatuskokeiden täsmällisen määrittämisen edes olevan välttämätöntä

niiden tarkastelun kannalta. Brown (2006) sanoo ajatuskokeen määrittelyn olevan yhtä mielekästä kuin esimerkiksi lojaaliuden, uskonnon tai merkityksellisen elämän määrittely. Hän luonnehtiikin ajatuskokeita karkeasti mielessä suoritettaviksi kokeiksi, joissa tyypillisesti kuvitellaan koejärjestely, suoritetaan koe ja katsotaan mitä tapahtuu. Tämä luonnehdinta hänen mielestään riittää ajatuskokeisiin liittyvien epistemologisesti ja pedagogisesti tärkeiden ja mielenkiintoisten kysymysten tarkasteluun. (Brown 2006.) Tutkijat voivat usein jättää määritelmät huomioimatta omassa arjessaan, sillä he ovat rakentaneet käsitteille merkitykset niiden pitkäaikaisen käytön seurauksena. Määritelmät ovat kuitenkin erityisen tärkeitä luonnontieteiden oppijoille. (Galili 2009.)

Ajatuskoe käsitteenä määritellään usein enemmän kuvailevasti kuin täsmällisesti (Velentzas, Halkia & Skordoulis 2007). Häggqvistin (2009) mukaan ajatuskoe on terminä epämääräinen. Hän määrittelee ajatuskokeet hypoteettisina tilanteina, joiden on tarkoitus toimia joko hypoteeseja tai teorioita testaavina kokeina. Häggqvist kuitenkin poissulkee ajatuskokeista hypoteettiset tapaukset, joiden tarkoituksena on havainnollistaa teoriaa, vaikka monia kyseisiä tapauksia todennäköisesti kutsuttaisiinkin ajatuskokeiksi. (Häggqvist 2009.) Klassen (2006) puolestaan ehdottaa ajatuskokeiden olevan anekdootteja eli lyhytsanaisia tapauksia alkeellisista luonnontieteellisistä tapahtumista, jotka johdattelevat lukijan tai kuuntelijan kohti ilmiselvää ratkaisua (Klassen 2006). Klassenin määritelmän voidaan ajatella kattavan myös Häggqvistin edellä mainitussa määritelmässä esiintyvät havainnollistavat hypoteettiset tapaukset, jolloin nämä määritelmät ovat keskenään ristiriidassa.

Borsboom, Mellenbergh ja Van Jeerden (2002) lähestyvät ajatuskokeen määritelmää hieman eri näkökulmasta. Heidän mukaansa kaikki tiede alkaa kontrafaktuaalilla eli vaihtoehtoisia tapahtumakulkuja tarkastelevalla ”Mitä, jos”-ajattelulla, jossa tarkasteltavaa tilannetta muokataan esittämällä erilaisia ”Mitä, jos”-kysymyksiä. Tällöin ajatuskoe voidaan löyhästi määritellä kontrafaktuaalisista lähtökohdista seuraavana päättelyketjuna (Borsboom ym. 2002.) Cooper (2005) jakaa tämän näkökulman sanomalla ajatuskokeiden olevan sarja ”Mitä, jos”-kysymyksiä. Hän lisää, että ajatuskoetta suoritettaessa maailmankuvaa pitää muokata hetkellisesti, jotta saadaan luotua malli, jonka avulla voidaan vastata näihin ”Mitä, jos”-kysymyksiin. Näiden kysymysten pohjalta ennustetaan, miten kuvitteelliset kohteet käyttäytyisivät tarkastellussa tilanteessa. Ideaalitulanteessa voidaan määrittää eksplisiittiset lait, jotka ennustavat kohteiden käyttäytymistä. (Cooper 2005.) Esimerkkinä tällaisista eksplisiittisistä laeista voisi toimia Newtonin liikelait.

Kaikkea luontoon liittyvää hypoteettista päättelyä ei kuitenkaan voida mieltää ajatuskokeiksi, vaan ajatuskokeella täytyy olla tietynlainen suhde sekä aikaisempiin empiirisiin havaintoihin että taustateoriaan (Asikainen & Hirvonen 2014). Edellä mainittua ”Mitä, jos”-kysymysten avulla saavutettua ajatuskokeen määritelmää ei siis voida pitää täsmällisenä, vaan lisää näkökulmia tarvitaan. Galili (2009) määrittelee ajatuskokeen kokoelmana todellisen maailman ilmiöihin liittyviä hypoteettis-deduktiivisia havaintoja, jotka perustellaan ajatuskokeen validoivalla aikaisemmalla teoriolla (Galili 2009).

Ajatuskokeet voidaan nähdä mentaalisiin malleihin perustuvana empiiristen kokeiden jatkumona (Bancong & Song 2020a). Islas Mondragón (2017) on samoilla linjoilla määrittelemällä ajatuskokeet toteuttamattomiksi kokeiksi, jotka on laadittu kumoamaan tai tukemaan luonnontieteellistä teoriaa. Useimmat ajatuskokeet laaditaan aikaisemmin hyväksytyyn empiirisen tiedon pohjalta, vaikka ne toteutetaankin tutkijoiden mielissä. (Islas Mondragón 2017.) Sekä empiirisessä kokeessa että ajatuskokeessa tehdään kuitenkin tarkasteltavasta tilanteesta todellisuutta mallintava yleinen johtopäätös (Malec 2018). Ajatuskoe voikin johtaa vahvistuksena toimivaan empiiriseen kokeeseen, jolloin ajatuskoetta voidaan pitää teorian ja kokeen yhdistävänä tekijänä (Blown & Bryce 2013). Gilbert ja Reiner (2000a) sanovat, että empiiristen kokeiden ja ajatuskokeiden suurin ero on se, että ajatuskokeet suoritetaan mentaalisesti (Gilbert & Reiner 2000a).

Picha (2016) sanoo ajatuskokeelle olevan kaksi välttämätöntä ehtoa: tilanteen kuvittelu ja mielikuvituksen käyttö. Ensinnäkin ajatuskokeen suorittajan tulee kuvitella käsiteltävä tilanne ja sen avulla antaa valistunut arvaus lopputuloksesta. Pichan mukaan kyseessä ei ole ajatuskoe, jos suorittaja kykenee vastaamaan kysymykseen laskutoimituksella, empiirisellä kokeella tai muilta kyselemällä. Toisekseen mielikuvituksen tulee olla mukana vastauksen löytämisessä. Kokeen suorittajan on kuviteltava käsiteltävä tilanne, jotta hän voi arvata, mitä kuvitelluissa olosuhteissa todennäköisesti tapahtuu. (Picha 2016.)

Ajatuskokeelle ei siis vielä ole tyhjentävää konsensusmääritelmää, mutta tutkimuskirjallisuudesta saadaan silti suhteellisen hyvä kuva siitä, mitä ajatuskoe pitää sisällään. Edellä tarkastellun kirjallisuuden perusteella voidaan sanoa, että ajatuskoe ja empiirinen koe ovat tieteellisinä työkaluina hyvinkin lähellä toisiaan, mutta ne poikkeavat luonteeltaan ja toteutustavaltaan toisistaan. Empiirisissä kokeissa johtopäätöksiin johtavat havainnot saadaan reaali maailmassa toteutettujen kokeiden tuloksista, kun taas ajatuskokeissa johtopäätökset tehdään tutkijan mielessään toteuttaman kokeen tuloksista, jolloin

mielikuvituksella on oltava rooli tutkimusprosessissa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että tutkija saa mielivaltaisesti päättää, miten tarkasteltava tilanne kehittyy. Satori (2023) kertoo luonnontieteellisen mielikuvituksen olevan usein totuuden ja valheen sekoitus, minkä lisäksi havainnot kumpuavat teoreettisista oletuksista, idealisaatioista ja abstraktioista (Satori 2023). Kuvittelun tilanteen tulee olla kytköksissä teoriaan, empiirisiin havaintoihin tai molempiin, jotta ajatuskokeen tuloksia voidaan soveltaa todellisiin ilmiöihin.

1.2 Ajatuskokeiden rakenne ja erityyppiset ajatuskokeet

Ajatuskokeet ja empiiriset kokeet ovat siis hyvin lähellä toisiaan, minkä vuoksi ajatuskokeen rakennekin mukailee pitkälti empiirisen kokeen rakennetta. Reiner ja Burko (2003) määrittivät viisi osaa, josta ajatuskoe koostuu: 1. kysymys, teorian valinta ja yleiset oletukset, 2. systeemin olennaisten ominaisuuksien tarkastelu, mikä vaikuttaa myös teorian valintaan, 3. ajatuskokeen toteutus, 4. tulosten erittely, 5. johtopäätökset. Kaksi ensimmäistä vaihetta ovat erittäin tärkeitä ajatuskokeen onnistumisen kannalta, ja virheelliset päätelmät usein juontavatkin juurensa juuri näissä vaiheissa tapahtuneisiin virheisiin. Loput vaiheista ovat yhtä virheellisiä sekä empiirisissä kokeissa että ajatuskokeissa. (Reiner & Burko 2003.)

Brown (2011) jakaa ajatuskokeet tarkoitukseltaan kolmeen pääluokkaan: destruktiivisiin, konstruktivisiin ja platonisiin. Destruktiivisen ajatuskokeen tarkoituksena on kumota teoria osoittamalla sen puutteet. Konstruktiviset ajatuskokeet tukevat valittua teoriaa ja ne voidaan jakaa kolmeen alakategoriaan: pohdiskeleviin (engl. *meditative*), hypoteettisiin (engl. *conjectural*) ja suoriin (engl. *direct*) ajatuskokeisiin. Pohdiskelevässä ajatuskokeessa johtopäätökset tehdään tietystä selkeästä teoriasta. Hypoteettisen ajatuskokeen tarkoituksena on todentaa ilmiö, jonka pohjalta pyritään löytämään ilmiötä selittävä teoria. Suora ajatuskoe lähtee liikkeelle tunnetusta ilmiöstä, kuten pohdiskelevä ajatuskoe, ja sen tavoitteena on tuottaa ilmiölle selkeä teoria, kuten hypoteettisenkin ajatuskokeen. Platoniset ajatuskokeet ovat sekä destruktiivisia että konstruktivisia. Ne kumoavat vanhan teorian ja luovat samalla uuden. (Brown 2011, 33–41.)

Kaikki eivät kuitenkaan ole yhtä mieltä ajatuskokeiden jakamisesta konstruktivisiin ja destruktiivisiin. Pichan (2016) mukaan monet paradoksit, opettavaiset kokemukset ja yksinkertaistukset pohjautuvat ajatuskokeisiin olematta kuitenkaan sellaisia. Ajatuskokeet eivät täten ole hänen mukaansa pohjimmiltaan konstruktivisia tai destruktiivisia, vaan niiden

tuloksia vain hyödynnetään argumentoinnissa. Argumentin ja näkökulman suhteesta riippuen näitä tuloksia voidaan käyttää sekä argumentin tukemiseen että kiistämiseen. (Picha 2016.)

Edellä mainittujen ajatuskoetyyppien lisäksi yksittäiset tutkijat ovat määritelleet erilaisia ajatuskoetyyppejä. Konsensusajatuskokeella tarkoitetaan ainakin hetkellisesti ja osittain tiedeyhteisön hyväksymää ajatuskoetta (Gilbert & Reiner 2000a). Merkittävät ja kauaskantoiset ajatuskokeet, jotka erityisesti kiinnittävät luonnontieteiden filosofien huomion, ovat kuitenkin suhteellisen harvinaisia, sillä ne ovat merkkejä vanhojen teorioiden kuolemasta tai uusien teorioiden synnystä (Balukovic, Slisko & Cruz 2017). Historiallinen ajatuskoe on puolestaan vanhentunut konsensusajatuskoe, joka on korvattu uudemmalla tiedolla. Historiallisia ajatuskokeita saatetaan kuitenkin edelleen käyttää selittämään joitakin ilmiöitä niiden yksinkertaisuuden vuoksi. Opetuksellinen ajatuskoe perustuu oppiaineille tuttuihin ja kuviteltavissa oleviin tilanteisiin, joiden avulla pyritään kehittämään ymmärrystä konsensusajatuskokeesta. (Gilbert & Reiner 2000a.)

Arvioivalla ajatuskokeella testataan luonnontieteellisen käsitteen, mallin tai teorian paikkansapitävyyttä ja yritetään ennustaa systeemin käyttäytymistä (Clement 2009). Funktionaalinen ajatuskoe luo käsitteellisen kehyksen, joka mahdollistaa teorian soveltamisen. Sen tarkoituksena ei ole kumota tai tukea teoriaa, vaan sen tarkoituksena on osoittaa teoria soveltuvaksi tietyn tilanteen tarkasteluun. (Borsboom ym. 2002). Yhteistyössä luotuja ajatuskokeita kutsutaan kollaboratiivisiksi ajatuskokeiksi (Bancong & Song 2020a).

1.3 Ajatuskokeet osana luonnontieteitä

Ajatuskokeet ovat merkittäviä sekä filosofisesti että luonnontieteellisesti (Klassen 2006). Niiden narratiivisuus ja muut perusominaisuudet tekevät niistä sekä tieteilijöiden keskeiseen että julkiseen diskurssiin erinomaisesti soveltuvan työkalun (Velentzas & Halkia 2011) ja ne voivat paljastaa joidenkin teorioiden yllättäviä seurauksia (Camilleri 2014). Vaikka empiirisistä kokeista tulikin modernin tieteen symboli, ajatuskokeet ovat säilyneet keskeisten tutkimustyökalujen joukossa. Luonnontieteellistä metodologiaa ei voida esittää tyhjentävästi ilman ajatuskoetta. (Galili 2009.)

Cooper (2005) sanoo ajatuskokeiden olevan välttämättömiä monesta syystä. Jotkin ajatuskokeet voivat olla käytännössä mahdollisia, mutta niitä ei voida perustellusti suorittaa kuin ajatuksen tasolla. Ne voivat olla epäeettisiä tai liian kalliita käytännön toteutukseen. Joitakin ajatuskokeita ei edes voida korvata empiirisillä kokeilla, sillä ne ovat fyysikaalisesti

mahdottomia. Ne voivat sisältää joko fysiikan lakien idealisointia tai suoria rikkomuksia. (Cooper 2005.) Ajatuskokeet eivät täten vaadi koelaitteistoa, minkä vuoksi käytännön rajoituksiakaan ei tarvitse huomioida (Velentzas, Halkia & Skordoulis 2007).

Ajatuskokeita voidaan käyttää moneen eri tarkoitukseen kuten tutkimukseen, opetukseen tai tieteen popularisointiin. Niiden avulla voidaan luoda yksinkertaistettuja, mutta edustavia malleja, jotka keskittyvät ilmiön kannalta olennaisiin tekijöihin. (Galili 2009.) Ajatuskokeiden avulla voidaan tutkia todellisen maailman malleja, paljastaa teorioiden luontaisia seurauksia (Cooper 2005) ja niillä voidaan ennakoida tulevaisuuden teorioita (Galili 2009).

Ajatuskokeilla on sama rooli diskurssissa kuin havainnoilla ja empiirisillä kokeilla. Nämä kaikki tuovat esiin uskomuksia, joita voidaan myöhemmin hyödyntää eri näkökulmien kiistämässä tai tukemisessa. (Picha 2016.) Vaikka ajatuskokeet ovat olleet tärkeitä tieteellisen tiedon kannalta, niiden luonteesta ja luotettavuudesta on kiistelty (Islas Mondragón 2017). Häggqvistin (2009) mukaan mahdolliset ajatuskokeisiin liittyvät kiistat ovat kuitenkin sosiologisia ilmiöitä, jotka voidaan selittää muutoin kuin ajatuskokeiden luotettavuudella tai epäilyttävyydellä. Toisaalta joistain ajatuskokeista ollaan lähes yksimielisiä, vaikkei pitäisi. Luonnontieteiden ja filosofian raja ei aina olekaan kovin tarkka. (Häggqvist 2009.) Cooperin (2005) mukaan luonnontieteitä ja filosofiaa vaikeampaa on erottaa toisistaan filosofiset ja luonnontieteelliset ajatuskokeet (Cooper 2005).

1.4 Ajatuskokeet opetuksessa

Ajatuskokeiden ja empiiristen kokeiden välillä on paljon yhtäläisyyksiä. Kummatkin kumpuavat teoriasta, ja niiden tarkoituksena on teorian muodostaminen, testaaminen ja soveltaminen. (Velentzas, Halkia & Skordoulis 2007.) Ajatuskokeet tarjoavat tarpeellisen johdannon kaikenlaiselle kokeelliselle toiminnalle. Kokeellisen toiminnan aloittaminen suoraan ilman ajatuskokeita usein vähentääkin sen oppilaille tarjoamaa merkitystä ja arvoa. (Galili 2009.) Reiner ja Gilbert (2004) sanovat kuitenkin perinteisten koulussa suoritettavien luonnontieteellisten kokeiden olevan alan tutkimuksesta poiketen erittäin strukturoituja. Ne eivät kumpua oppilaiden omista tavoitteista, tiedoista tai päättelystä, vaan sisäistämättömästä tai jopa osittain vieraasta teoriasta. Reiner ja Gilbert kuvaavatkin oppimisprosessin olevan usein yksisuuntainen ”oppimistunneli”, jossa on vain yksi ainoa menetelmä ja vastaus sen sijaan, että oppilaan annettaisiin itse olla aktiivinen toimija. (Reiner & Gilbert 2004.) Tällainen lähestymistapa on ristiriidassa myös perusopetuksen opetussuunnitelman

perusteiden 2014 (myöhemmin POPS 2014) oppimiskäsitystä vastaan, jonka mukaan oppilas on aktiivinen toimija (POPS 2014, 17).

Luonnontieteiden historia tarjoaa useita ajatuskokeiden kauneuden ja rikkauden havainnollistavia esimerkkejä. Näiden esimerkkien lisääminen opetukseen rikastaa oppilaiden käsitteellistä ymmärrystä, antaa työkaluja luonnontieteelliseen ajatteluun ja auttaa ymmärtämään luonnontieteellisten prosessien todellista luonnetta. (Özdemir 2009.) 1800- ja 1900-luvulla ajatuskokeet edistivät modernia fysiikkaa etenkin suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan saralla. Tämän vuoksi moderniin fysiikkaan johdattelu olisi hyvä toteuttaa tiettyyn aiheeseen liittyvän ajatuskokeen, kuten Einsteinin hissien, Maxwellin demonin, Schrödingerin kissan tai Heisenbergin mikroskoopin, tarkastelulla. (Kösem & Özdemir 2014.)

1.4.1 Hyödyt opetuksessa

Gilbert ja Reiner (2000a) sanovat, ettei ajatuskokeilla ole vain historiallista merkitystä, vaan ne ovat myös tärkeä osa oppilaiden sosiaalistamista luonnontieteelliseen tutkimukseen. Luonnontieteiden opetuksen päätehtävänä on kehittää oppilaiden ymmärrystä kohti tieteilijöiden käyttämiä käsitteitä. Ajatuskokeiden opetuskäytön tulisikin peilata niiden roolia luonnontieteissä, jotta niiden hyödyntäminen on tarkoituksenmukaista. Tämä edellyttää sitä, että ajatuskokeiden käyttö noudattaa luonnontieteiden oppimisen psykologian keskeisiä elementtejä eli konstruktivismia ja konnektionismia. (Gilbert & Reiner 2000a; Reiner & Gilbert 2000b.) Ajatuskokeet johdattavat oppilaat tieteen kulttuuriin luomalla siitä autenttisen kuvan (Galili 2009).

Klassen (2006) puolestaan sanoo ajatuskokeiden tehokkaan pedagogisen käytön edellyttävän tieteellisen sisällön upottamista tarinaan. Ajatuskokeita ei voi automaattisesti ajatella kertomuksina, vaan ne pitää muokata noudattamaan kertomuksen rakennetta opetuskäyttöä varten. Oikein kerrottuina ajatuskokeet ovat ideaalisten kokeiden tarinamaisia uusintoja, jotka innostavat lukijaa tai kuuntelijaa miettimään niiden sisältöä ja mahdollisia vaihtoehtoisia tapahtumakulkuja. (Klassen 2006.) Ajatuskokeet voivat toimia yhdistävänä tekijänä oppilaiden arkikokemusten ja uusien opittavien käsitteiden välillä (Ince, Acar & Atakan 2016). Ne aktivoivat oppilaiden mielikuvituksen ja mahdollistavat myös käytännössä mahdottomien tilanteiden käsittelemisen (Galili 2009).

Erityyppisiä ajatuskokeita voidaan käyttää opetuksessa eri tavoin. Gilbert ja Reiner (2000a) sanovat, että destruktiiviset ajatuskokeet auttavat oppilaita ymmärtämään luonnontieteiden

historiallista ja psykologista kehitystä. Pohdiskelevia ajatuskokeita voidaan hyödyntää abstrakteista teorioista tehtäviin empiirisiin johtopäätöksiin, kun taas hypoteettisen ja suoran ajatuskokeen avulla voidaan kehittää teorian ymmärrystä. Platoniset ajatuskokeet ovat sekä destruktiivisen että konstruktivisen luonteensa puolesta kaikkein monipuolisimpia opetuskäyttöön. (Gilbert & Reiner 2000a.) Platonisten ajatuskokeiden tärkeys juontaa juurensa niiden kyvystä kumota olemassa oleva ja samalla luoda uusi oletettavasti parempi teoria (Islas Mondragón 2017). Historiallisesta näkökulmasta esitetyt ajatuskokeet voivat puolestaan auttaa selittämään fysikaalisia käsitteitä selkeämmin ja seikkaperäisemmin (Bancong & Song 2018).

Ajatuskokeen suorittaminen on kognitiivista toimintaa, jossa yksilöllä on oltava tiettyjä taitoja arvioiden ja päätösten tekemiseen (Camilleri 2014). Ajatuskokeet voivatkin olla hedelmällinen lähestymistapa vahvistaa oppilaiden kognitiivista sitoutumista oppimisprosessiin (Bancong & Song 2018). Niiden opetuskäyttö pakottaa oppilaat käyttämään mielikuvitusta, kehittämään kriittistä ajattelua, tekemään hypoteeseja ja johtopäätöksiä sekä kertomaan ja perustelemaan mielipiteitä luokkatovereilleen. Nämä taidot edelleen kehittävät oppilaiden luonnontieteellistä ajattelua sekä ymmärrystä käsitteistä ja teorioista. (Velentzas, Halkia & Skordoulis 2007.)

Ajatuskokeet voivat antaa viitteitä oppilaan ajatusprosesseista. Galili (2009) sanoo ajatuskokeiden mahdollistavan oppilaan omaksumien luonnontieteelliseen ilmiöön liittyvien käsitysten paljastumisen. Ajatuskokeisiin liittyvä hypoteettis-deduktiivinen päättely rohkaisee oppilasta ilmaisemaan omia käsityksiään, mikä auttaa myös opettajaa omassa arviointityössään. (Galili 2009.) Ajatuskokeet voivatkin tarjota erittäin hyödyllisiä heuristisia tai pedagogisia oivalluksia (Brown 2006).

1.4.2 Ajatuskokeiden opetuskäytön mahdolliset ongelmat

Ajatuskokeiden soveltaminen opetuskäyttöön ei ole yksinkertaista. Ajatuskokeiden opetuskäytön osoitetuista hyödyistä huolimatta suositukset niiden tarkoituksenmukaisesta soveltamisesta ja siitä, miten auttaa oppilaita löytämään ajatuskokeisiin tarvittavat tehokkaat ajatusprosessit ovat edelleen harvassa (Bancong & Song 2020a). Gilbert ja Reiner (2000a) sanovat, että luonnontieteiden opetuksessa ajatuskokeet usein supistetaan ajatussimulaatioiksi eikä potentiaalisia hetkiä ajatuskokeiden hyödyntämiselle useinkaan tunnisteta. Ajatussimulaatioiden käyttö ajatuskokeiden sijasta vähentää oppilaiden kognitiivista toimintaa, joka on oppimisen ja kehittymisen avain. (Gilbert & Reiner 2000a.)

Ajatuskokeet voivat myös johtaa harhaan aivan kuten empiirisetkin kokeet (Brown 2006), ja jopa meritoituneet fyysikot tekevät ajoittain vääriä johtopäätöksiä (Reiner & Burko 2003). Cooper (2005) kertoo ajatuskokeiden voivan epäonnistua kahdella eri tavalla. Ensimmäisenä syynä on ajatuskokeen suorittajan kykenemättömyys vastata tilanteen vaatimiin kysymyksiin oikein. Suorittajalla ei välttämättä ole eksplisiittistä, implisiittistä tai minkäänlaista tietoa kuvitellussa tilanteessa pätevistä lainalaisuuksista tai hänellä on tieto todellisen maailman lainalaisuuksista, mutta kyseiset lait eivät pädekään kuvitellussa tilanteessa. (Cooper 2005.) Vaikka oman taustatiedon relevanssi tunnistettaisiin, eivät tiedon soveltamisen mahdollisuudet välttämättä ole heti selvillä. Ajatuskokeiden onnistuminen riippuukin usein kognitiivisesta kyvystä tunnistaa aiemman tiedon olennaisuus tarkasteltavan tilanteen kannalta. (Camilleri 2014.) Toisena syynä ajatuskokeen mahdolliselle epäonnistumiselle Cooper mainitsee sen, ettei ajatuskokeen suorittaja tiedä, onko sisäisesti johdonmukainen malli saatu lopputuloksena luotua (Cooper 2005). Toisin sanoen suorittaja ei siis tiedä, onko kokeen tulos yleistettävissä vai ei.

Reiner ja Burko (2003) määrittävät kolme kognitiivista prosessia, jotka voivat johtaa ajatuskokeen väärään lopputulokseen. Ensinnäkin ajatuskokeen suorittaja voi luottaa liikaa intuitioon teorian sijaan. Ajatuskokeen kuvitteellisen maailman perustana olevat oletukset voivat myös olla vajavaisia tai jopa epäolennaisia. Vastaavat kognitiiviset mekanismit ovat juurtuneet fysikaaliseen ajatteluun ja näiden prosessien odotetaan tapahtuvan aloittelevien oppijoiden fysiikan oppimisessa. Naiivit oppijat todennäköisemmin korvaavat teoreettiset mallit intuitiivisella tiedolla ja käyttävät tiedostamattaan ajatuskokeiden maailman luomiseen ennemmin aiempia arkisia kokemuksiaan kuin loogista päättelyä. (Reiner & Burko 2003.) Ajatuskokeen tekijän onkin osattava kuvitella koe niin, että empiirisen kokeen mahdolliset virhelähteet voidaan eliminoida (Klassen 2006). Esimerkiksi arkikokemus karkkipaperin hitaammasta putoamisesta makeiseen verrattuna ei vastaa ideaalista tilannetta, jossa ilmanvastusta ei huomioida ja kumpikin putoaa yhtä nopeasti.

1.4.3 Ajatuskoeprosessien resurssit

Arkikokemukset ovat kuitenkin keskeinen osa ajatuskokeiden opetuskäyttöä. Ajatuskokeissa on mahdollista hyödyntää aiemmin todellisesta maailmasta hankittuja kokemuksia (Clement 2009). Ajatuskokeiden opetuskäytön potentiaalinen voimavara piileekin oppilaiden mahdollisesti tiedostamattomassa kehollisessa ja visuaalisessa tiedossa (Reiner & Gilbert 2000b). Reiner (2006) kertoo kehollisen tiedon olevan tietoa, jonka avulla voidaan kuvitella,

miltä kappaleen liike tuntuu. Se on syntynyt aistiperäisistä arkikokemuksista. Oppilas voi hyödyntää kehollista tietoaan kuvitellessaan itsensä esimerkiksi kiihtyvän auton kyytiin, kääntyvänsä polkupyörällä tai tullessaan väkijoukon työntämäksi uloskäyntiä kohti kävellessään. (Reiner 2006.) Visuaalinen tieto puolestaan auttaa oppilaita käsittelemään kuviteltuja tilanteita animaatiomaisesti (Reiner & Gilbert 2000b).

Kehollisen ja visuaalisen tiedon käyttö ajatuskokeissa mahdollistaa sen, että oppilaat voivat löytää ja hyödyntää eksplisiittistä tietoa, joka on jo jollain tasolla olemassa sanoittamattomassa ja implisiittisessä muodossa. Ajatuskokeet edesauttavat oppimisprosessia tuomalla tämän hiljaisen tiedon eksplisiittiseksi ja näkyväksi. (Reiner & Gilbert 2000b.) Reiner (2006) kertoo, että oppilaiden on havaittu hyödyntävän kolmea erilaista strategiaa implisiittistä tietoa käyttäessään. Ensimmäisenä mainittuna strategiana he voivat kuvitella itsensä kappaleen tilalle ja täten miettiä, miltä kappaleeseen vaikuttavat voimat tuntuvat. Toiseksi oppilaat saattavat kommentoida suoraan kappaleeseen vaikuttavia voimia, ja kolmantena strategiana mainittiin oppilaiden kommentoivan kuviteltuja voimia kuten ne kohdistuisivat heidän omaan kehoonsa. (Reiner 2006.)

Kontekstilla on myös merkitystä implisiittisen tiedon saavuttamisessa. Reiner (2006) sanoo kontekstuaalisen ympäristön tarjoavan vihjeitä, jotka automaattisesti antavat pääsyn implisiittiseen tietoon. Esimerkiksi kuvittelemalla kiihtyvä tai hidastuva pallo voidaan auttaa visualisoimaan sen lentorata ilman formaaleja laskutoimituksia. Implisiittisen tiedon hyödyntäminen vähentääkin abstraktin formaaliuden taakkaa ja tarjoaa oppimiselle intuitiivisen perustan. Kontekstuaaliset ympäristöt mahdollistavat pääsyn muutoin hiljaiseen tietoon, jonka avulla voidaan saavuttaa ilmiöstä perusymmärrys. (Reiner 2006.) Konteksti on tärkeä implisiittisen tiedon laukaisija (Reiner 2006) ja ajatuskokeilla voidaankin auttaa oppilaita kehittämään intuitiivisia ”arkitoituksia” luonnontieteen käsitteistä ja prosesseista (Klassen 2006).

1.4.4 Oppilaat ajatuskokeiden suorittajina

Luonnontieteilijöiden suorittamien ajatuskokeiden lisäksi myös oppilaiden omat spontaanit ajatuskokeet ovat tärkeitä oppimisen kannalta. Kummatkin tutustuttavat oppilaat tieteellisen tiedon luomiseen ja sen väliaikaiseen luonteeseen korostamalla itse- ja vertaiskriittikin merkitystä. (Reiner & Burko 2003.) Oppilaat harvoin kuitenkaan suunnittelevat tekevänsä ajatuskokeita eivätkä he ole tieteilijöiden tavoin tietoisia päättelytavoistaan. Oppilaat

käyttävät ajatuskokeita spontaanisti lähinnä apukeinona tarkasteltavan tilanteen kontekstin ymmärtämisen. (Reiner 2006.)

Oppilaiden suorittamat ajatuskokeet nojaavat vahvasti heidän naiiveihin käsityksiinsä ja hajanaisiin mielikuviin fysiikasta, minkä vuoksi heidän ajatuskokeidensa tulokset harvemmin vastaavat todellista fysiikkaa. Oppilaiden suorittama epäonnistuneiden ajatuskokeiden reflektointi voi kuitenkin auttaa heitä korjaamaan virheelliset käsityksensä teoriaan liittyen. (Reiner & Burko 2003.) Ajatuskokeet voivat näyttää, onko jokin tilanne mahdollinen, ja täten opettaa jotain todellisesta maailmasta. Mahdottomaan tilanteeseen päätyminen kertoo, miten maailma ei toimi, kun taas väistämätön tilanne näyttää, miten maailman on toimittava. (Cooper 2005.)

Ongelmia voi muodostua erityisesti, jos oppilaiden täytyy itse kehittää ajatuskokeen kuvitteellinen ympäristö. Reiner (1998) kertoo, etteivät useimmat oppilaat ole tottuneet käyttämään visualisointiprosesseja, joita ajatuskokeiden hypoteettisen maailman luomiseen tarvitaan. Oppilaiden tulee myös osata sanallistaa nämä kuvitelmat, mikä entisestään hankaloittaa ajatuskokeiden opetuskäyttöä. Reiner ehdottaakin ratkaisuksi havainnollistavaa tietotekniikan käyttöä, minkä avulla näkymättömät ilmiöt kuten voimat ja valonsäteet voidaan tehdä näkyviksi, jolloin oppilaiden keskinäinen kommunikaatiokin helpottuu. (Reiner 1998.) Ajatuskokeissa kuvaillaan tavallisesti myös niin abstrakteja tilanteita, ettei niitä voida todellisessa maailmassa toistaa. Tämänkin ongelman ratkaisuun voidaan hyödyntää tietotekniikkaa. (Velentzas, Halkia & Skordoulis 2007.) Opetusteknologia tarjoaa erinomaisia ympäristöjä aistihavaintoihin perustuvaan kokeiluun ja oppimiseen (Reiner & Gilbert 2004). Luonnontieteiden teorioita voidaan havainnollistaa videoilla, jotka auttavat oppilaita luomaan parempia mielikuvia ajatuskokeita suorittaessaan (Bancong, Nurzami & Sirajuddin 2023).

Ajatuskoe oikein toteutettuna on erittäinkin potentiaalinen opetusmenetelmä, jolla voidaan saavuttaa hyviä oppimistuloksia. Niiden opetuskäyttö ei kuitenkaan ole vielä vakiintunutta, mikä todennäköisesti selittyy empiiristen kokeiden opetuskäytön vankalla suosiolla. Tämän tutkielman tarkoituksena onkin selvittää, miten ajatuskokeiden käyttöä luonnontieteiden opetuksen kontekstissa on käytännössä tutkittu.

2 Tutkimuskysymykset

Edeltävän johdannon pohjalta voidaan sanoa ajatuskokeiden olevan tärkeä osa luonnontieteitä, jolloin niiden tulisi olla osa luonnontieteiden opetustakin. Tämän vuoksi tarvitaan lisää tietoa ajatuskokeiden opetuskäytöstä. Tässä tutkielmassa halutaan selvittää:

1. Miten ajatuskokeiden käyttöä luonnontieteiden opetuksen kontekstissa on tutkittu empiirisesti?
 - a. Minkälaisia ajatuskokeita on hyödynnetty ja minkälaisia oppimistuloksia niiden avulla on saavutettu?
2. Minkälaisia ajatuskokeita luonnontieteiden opetuksen kontekstissa luodaan?
 - a. Miksi ajatuskokeita luodaan luonnontieteiden opetuksen kontekstissa?
 - b. Miten akateeminen kokemus vaikuttaa ajatuskoeprosesseihin?

Tässä tutkielmassa luonnontieteiden opetuksen kontekstilla tarkoitetaan tilanteita, jossa selvitetään osallistujien tietoja, oppimis- ja ongelmanratkaisuprosesseja sekä oppimistuloksia luonnontieteiden aihealueisiin liittyen. Tutkimusasetelman ei tarvitse olla ”perinteinen”, jossa opettaja tai tutkija seuraa oppilaita, vaan myös opiskelijat ja opettajat voivat olla tutkimusten osallistujia.

3 Menetelmä

Tutkimus toteutettiin systemaattisena kirjallisuuskatsauksena, joka on systemaattinen ja eksplisiittinen toistettava menetelmä, jolla tunnistetaan, arvioidaan ja syntetisoidaan nykyinen tutkimuskirjallisuus (Fink 2005, 3). Katsauksen suorittajan tulee esittää kattava, kriittinen ja täsmällinen arvio tietyn aihealueen tutkimuksen nykytilasta vertailemalla tutkimuksia, osoittamalla aukkoja nykyisessä tutkimuskirjallisuudessa ja tekemällä jatkotutkimusehdotuksia (Efron & Ravid 2019, 2).

3.1 Finkin malli

Menetelmälliseksi kehykseksi valikoitui Finkin (2005) esittämä systemaattisen kirjallisuuskatsauksen malli, sillä se antaa täsmälliset raamit oikeanlaisen prosessin suorittamiseksi. Malli koostuu seitsemästä vaiheesta: tutkimuskysymysten valinta, tietokantojen valinta, hakusanojen valinta, käytännön seula (engl. *Practical Screen*), menetelmällinen seula (engl. *Methodological Quality Screen*), katsauksen suorittaminen, tulosten synteesi ja raportointi. Täsmälliset tutkimuskysymykset ohjaavat tutkimusprosessia. Oikeiden tietokantojen ja hakusanojen valinnat auttavat pääsemään olennaisen tutkimusaineiston äärelle. Käytännön ja menetelmällisen seulan avulla valitaan tietyt kriteerit täyttävät tutkimukset tarkempaan tarkasteluun ja suodatetaan epäolennaiset tutkimukset pois. Katsausta suoritettaessa kerätään valituista tutkimuksista olennainen tieto, joka tulosten synteessissä jäsennellään ja raportoidaan. (Fink 2005, 3–5). Tutkimusprosessin eteneminen Finkin mallia mukaillen on havainnollistettu taulukossa 1.

Taulukko 1. Tutkimusprosessi Finkin mallia mukaillen.

Tutkimuskysymysten valinta	<p>Miten ajatuskokeiden käyttöä luonnontieteiden opetuksen kontekstissa on tutkittu empiirisesti?</p> <ul style="list-style-type: none"> Minkälaisia ajatuskokeita on hyödynnetty ja minkälaisia oppimistuloksia niiden avulla on saavutettu? <p>Minkälaisia ajatuskokeita luonnontieteiden opetuksen kontekstissa luodaan?</p> <ul style="list-style-type: none"> Miksi ajatuskokeita luodaan luonnontieteiden opetuksen kontekstissa? Miten akateeminen kokemus vaikuttaa ajatuskoeprosesseihin?
Tietokantojen valinta	<ul style="list-style-type: none"> Education Database Education Source Ultimate ERIC Teacher Reference Center Utuvolter
Hakusanojen valinta	<ul style="list-style-type: none"> Thought experiment* (otsikossa)
Käytännön seula	<ul style="list-style-type: none"> Koko tekstin saatavuus verkossa Englannin kieli Vertaisarvioitu tutkimus
Menetelmällinen seula	<ul style="list-style-type: none"> Ihmisiä tutkivat empiiriset tutkimukset Ajatuskokeiden käyttöä luonnontieteiden opetuskontekstissa koskevat tutkimukset Ajatuskokeiden oltava tutkimuksen keskiössä ja siihen liittyvät tulokset on oltava avattuna
Katsauksen suorittaminen	<ul style="list-style-type: none"> Aineistolähtöinen sisällönanalyysi
Tulosten synteesi ja raportointi	

3.2 Aineiston keruu

Tutkimuskirjallisuushakujen tietokannoiksi valikoituivat kasvatustieteiden keskeisimmät tietokannat Education database, Education Source Ultimate, ERIC ja Teacher Reference Center sekä Turun yliopiston kirjaston tietokanta Utuvolter. Hakulausekkeeksi valikoitui *Thought experiment**, jonka piti esiintyä teoksen otsikossa. Experiment-sanan lopussa oleva asteriski katkaisee sanan niin, että lausekkeella löytyy kaikki kyseisen sanan taivutusmuodot. Muina käytännön seuloina toimivat koko tekstin saatavuus verkossa ja englannin kieli. Tutkimusten tuli olla myös vertaisarvioituja. Suomenkielisiä vertaisarvioituja tutkimuksiakin haettiin lausekkeella *Ajatusko**, mutta yhtään hakutulosta ei löytynyt. Tietokantahaku

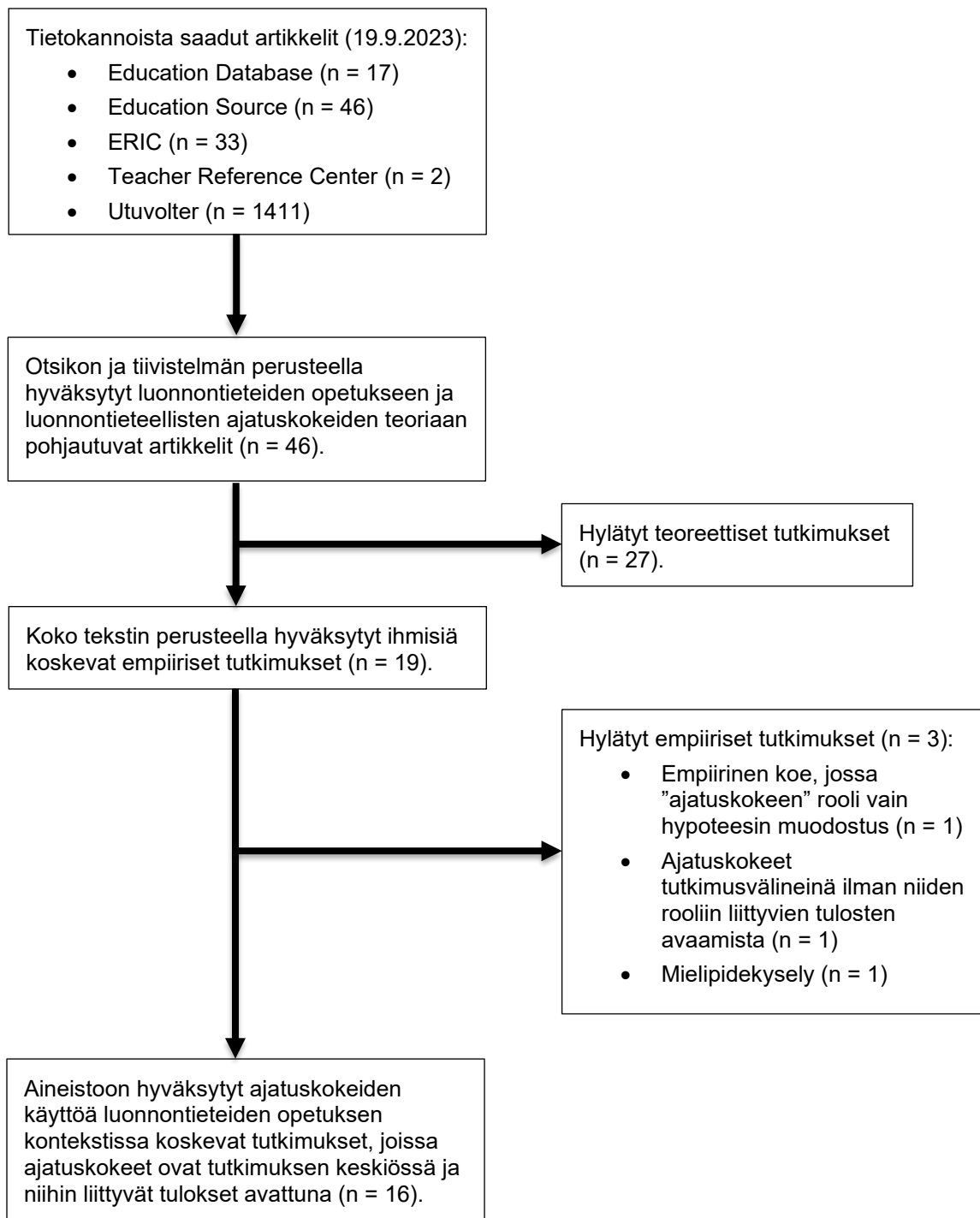
suoritettiin 19.9.2023. Hakutuloksista tarkempaan tarkasteluun hyväksyttiin otsikon ja tiivistelmän perusteella luonnontieteiden opetukseen liittyvät ja yleisesti luonnontieteellisten ajatuskokeiden teoriaa koskevat artikkelit. Hakutulokset tietokannoittain löytyvät kronologisessa järjestyksessä taulukosta 2.

Taulukko 2. Tietokantojen hakutulokset.

Tietokanta	Hakutulokset	Aiemmasta tietokannasta hyväksytyt	Uudet hyväksytyt
Education Database	17	-	5
Education Source	46	3	15
ERIC	33	15	1
Teacher Reference Center	2	0	0
Utuvolter	1411	24	25
Yhteensä			46

Taulukossa 2 nähdään hakusanoilla tietokannoista löytyneiden tutkimusartikkelien määrä. Hakutulokset viittaavat hakulausekkeen ja käytännön seulojen kanssa tietokannasta löytyneiden artikkeleiden kokonaismäärään. Aiemmasta tietokannasta hyväksytyillä tarkoitetaan tarkastellusta tietokannasta hakutuloksena saatuja artikkeleja, jotka on saatu hakutuloksena jo aiemmin tarkastellusta eri tietokannasta ja hyväksytyt jo tällöin tarkempaan tarkasteluun. Uusilla hyväksytyillä tarkoitetaan tarkastellusta tietokannasta hakutuloksina saatuja uusia kriteerit täyttäviä artikkeleja, joita ei ollut löytynyt aiemmin eri tietokannasta.

Kuten taulukosta 2 nähdään, tarkempaan tarkasteluun valikoitui 46 artikkelia. Näistä valikoitiin menetelmällisen seulan mukaan empiiriset tutkimukset, joissa tutkittiin ihmisiä. Kyseisiä tutkimuksia oli 19, joista seulottiin pois vielä kolme tutkimusta. Ensimmäisessä seuluista tutkimuksista keskityttiin ajatuskokeiden sijasta empiirisen kokeen suorittamiseen ja ”ajatuskokeen” rooliksi jäi vain hypoteesin empiirisen kokeen muodostaminen. Toisessa ajatuskokeita käytettiin ainoastaan välineenä lasten painovoimakäsitysten tutkimisessa eikä ajatuskokeisiin itseensä liittyviä tuloksia ollut avattu. Kolmannessa poissuljetussa artikkelissa tutkittiin ainoastaan opettajien mielipiteitä. Täten lopulliseksi tarkasteltavien tutkimusten määräksi jäi 16. Aineistonhakuprosessi on havainnollistettu kuviossa 1.



Kuvio 1. Aineistonhakuprosessi havainnollistettuna.

3.3 Aineiston analyysi

Finkin (2005) mukaan kirjallisuuskatsauksen tulosten synteessillä on neljä päätavoitetta: nykyisen tiedon kuvailu, tutkimustulosten selittäminen, uuden tutkimuksen tarpeen ja tärkeyden korostaminen, sekä tutkimuskirjallisuuden laadun kuvailu (Fink 2005, 188). Nykyistä tietoa ja tutkimustulosten selityksiä tarkasteltiin aineistolähtöisen sisällönanalyysin kautta. Aineistolähtöisen sisällönanalyysin tarkoituksena on tulkinnan ja päättelyn kautta saada käsitteellinen näkemys empiirisestä aineistosta, mutta sitä voidaan hyödyntää myös systemaattisissa kirjallisuuskatsauksissa. Tarkasteltavien tutkimusten tieto voidaan koota ja tiivistää aineistolähtöiselle sisällönanalyysille tyypillisellä lajittelulla. (Tuomi & Sarajärvi 2009, 112, 123.) Valikoidut tutkimukset voitiinkin tyypitellä tutkimusasetelman ja tutkimusjoukon perusteella.

3.4 Tutkimusten luokittelu

Aineistolähtöisen sisällönanalyysin ensimmäinen osa on aineiston pelkistäminen, kuten siitä saadun informaation tiivistäminen. Toisena vaiheena toimii aineiston ryhmittely, jossa aineistosta löytyvät samankaltaisuudet ryhmitellään omiksi kokonaisuuksikseen. (Tuomi & Sarajärvi 2009, 108–110.) Ensin pelkistettiin ajatuskokeiden roolit tarkempaan tarkasteluun valikoiduissa tutkimuksissa, minkä perusteella tutkimukset jaettiin kahteen eri yläluokkaan. Ensimmäisessä yläluokassa, annettujen ajatuskokeiden tutkimukset, ovat tutkimukset, joissa osallistujille annettiin suoritettavaksi jokin tietty tunnettu konsensusajatuskoe tai sellaisesta johdettuja tehtäviä. Osallistujat suorittivat ajatuskokeen tai siitä johdetut tehtävät joko itsenäisesti tai ryhmässä. Tämän pohjalta heidän oppimistaan ja ymmärrystään arvioitiin. Tähän annettujen ajatuskokeiden yläluokkaan kuuluvia tutkimuksia oli seitsemän ja ne löytyvät taulukosta 3.

Taulukko 3. Annettujen ajatuskokeiden tutkimukset.

Tutkijat	Julkaisu-uusi	Otsikko	Toteutusvaltio	Tutkittavat	Ajatuskokeet	Menetelmä	Suoritus
Asikainen & Hirvonen	2014	Probing Pre- and In-service Physics Teachers' Knowledge Using the Double-Slit Thought Experiment	Suomi	9 fysiikanopettajaopiskelijaa (3.–5. vsk.) ja 18 valmistunutta fysiikan opettajaa	Kaksoisrakoajatuskoe	Paperinen koe ja kolmen osallistujan haastattelu	Yksilöllinen
Dua, HarraHau & Elizabeth	2020	Probing High School Students' Understanding of Einstein's Theory of Gravity Using Thought Experiments and Analogy	Indonesia	12 lukiolaista	Einsteinin hissi	Pre-test, 5 opetuskertaa ja post-test	Yksilöllinen
Myhrehagen & Bungum	2016	"From the cat's point of view": Upper secondary physics students' reflections on Schrödinger's thought experiment	Norja	n. 170 lukiolaista	Schrödingerin kissa	Opetus ja avoin reflektiivinen vastaus	Yksilöllinen tai pareittain
Velentzas & Halkia	2013a	From Earth to Heaven: Using 'Newton's Cannon' Thought Experiment for Teaching Satellite Physics	Kreikka	40 lukiolaista	Newtonin kanuuna	Opetus (2h) ja post-test 2 viikkoa myöhemmin	3–4 hengen ryhmät
Velentzas & Halkia	2013b	The Use of Thought Experiments in Teaching Physics to Upper Secondary-Level Students: Two examples from the theory of relativity	Kreikka	40 lukiolaista	Einsteinin hissi ja Einsteinin juna	Ajatuskokeiden suoritus ohjastusti (2h) ja post-test 15 päivää myöhemmin	3–4 hengen ryhmät
Velentzas & Halkia	2011	The 'Heisenberg's Microscope' as an Example of Using Thought Experiments in Teaching Physics Theories to Students of the Upper Secondary School	Kreikka	40 lukiolaista	Heisenbergin mikroskooppi	Opetus (1,5 h) ja post-test 15 päivää myöhemmin	3–4 hengen ryhmät
Velentzas, Halkia & Skordoulis	2007	Thought Experiments in the Theory of Relativity and in Quantum Mechanics: Their Presence in Textbooks and in Popular Science Books	Kreikka	Kuuden 9.-luokkalaisen ryhmä	Einsteinin hissi	Opiskelu, tehtävämöniste ja itsearviointi (yht. 2h)	Taitotasoltaan sekalainen ryhmä

Annettujen ajatuskokeiden tutkimusten yläluokkaan kuuluvat artikkelit jaettiin vielä kolmeen alaluokkaan niiden taustateorian perusteella. Ensimmäinen alaluokka oli suhteellisuusteoreettiset ajatuskokeet, joihin lukeutuivat Einsteinin hissi (Liite 1) ($n = 3$) ja Einsteinin juna (Liite 2). Toinen alaluokka oli kvanttimekaaniset ajatuskokeet, joita olivat Schrödingerin kissa (Liite 3), kaksoisrakoajatuskoe (Liite 4) ja Heisenbergin mikroskooppi (Liite 5). Kolmanneksi alaluokaksi muodostui Klassisen mekaniikan ajatuskokeet, sillä yhdessä tutkimuksessa ajatuskokeena käytettiin Newtonin kanuunaa (Liite 6), jonka teoriapohjana toimii klassinen mekaniikka.

Toiseen ryhmään, luotujen ajatuskokeiden tutkimukset, kuuluvat tutkimukset, joissa tarkasteltiin tutkittavien itse luomia ajatuskokeita. Näissä tutkimuksissa on tarkasteltu osallistujien yksilöllisesti tai ryhmässä luomia ajatuskokeita heidän suorittaessaan erilaisia ongelmanratkaisutehtäviä. Luotujen ajatuskokeiden ryhmään lukeutuvia tutkimuksia oli yhdeksän ja ne löytyvät taulukosta 4.

Taulukko 4. Luotujen ajatuskokeiden tutkimukset.

Tutkijat	Julkaisuvuosi	Otsikko	Toteutusvaltio	Tutkittavat	Menetelmä	Suoritus
Bademci & Sari	2014	Thought Experiments in Solving Physics Problems: A Study into Candidate Physics Teachers	Turkki	22 ensimmäisen vuoden fysiikanopettajaopiskelijaa ja 28 viidennen vuoden fysiikanopettajaopiskelijaa	Ensimmäisessä osassa avoimet kysymykset liikelaeista. Toisessa osassa avoimet kysymykset, havainnot ja haastattelut. Toiseen osaan valittiin parhaat pisteet saneet viisi ensimmäisen vuoden opiskelijaa ja neljä viidennen vuoden opiskelijaa.	Yksilöllinen
Bancong & Song	2020a	Exploring How Students Construct Collaborative Thought Experiments During Physics Problem-Solving Activities	Indonesia	6 kandidaattivaiheen fysiikanopettajaopiskelijaa ja 6 maisterivaiheen fysiikanopettajaopiskelijaa	Fysiikan ongelmaratkaisutehtävien havainnointi ja haastattelut	4 hengen tasoryhmät
Bancong & Song	2020b	Investigating the purposes of thought experiments: Based on the students' performance	Indonesia	6 kandidaattivaiheen fysiikanopettajaopiskelijaa ja 6 valmistunutta fysiikanopettajaopiskelijaa	Fysiikan ongelmanratkaisutehtävien havainnointi	4 hengen tasoryhmät
Ince, Acar & Atakan	2016	Investigation of physics thought experiments' effects on students' logical problem solving skills	Turkki	50 fysiikan kandidaattiopiskelijaa	7 viikon aikana oman ajatuskokeen muodostaminen itse keksityn ongelman pohjalta. Ajatuskokeiden vaiheiden toteutukset pisteytettiin.	7–8 hengen ryhmät
Kösem & Özdemir	2014	The Nature and Role of Thought Experiments in Solving Conceptual Physics Problems	Turkki	5 fysiikan tohtorikoulutettavaa, 5 kandidaattivaiheen fysiikan opiskelijaa ja 5 lukiolaista	Mekanikan lakeihin perustuvia ongelmanratkaisutehtäviä, joissa sanallistetaan puhumalla omaa ajatteluaan	Yksilöllinen
Reiner	1998	Thought experiments and collaborative learning in physics	Israel	12 lukiolaista	Optikkaan liittyvän ongelmanratkaisutehtävän kollaboratiivinen suorittaminen tietokonesimulaation ja fyysisten apuvälineiden avulla	Ryhmissä
Reiner & Gilbert	2004	The symbiotic roles of empirical experimentation and thought experimentation in the learning of physics	Israel	29 yläkoululaista, joista videoitiin yksi satunnaisesti valittu ryhmä	Tarkoitus ymmärtää kiinnostavan magneettisen lelun toimintaperiaate ja jäljentää systeemi tulevaan tiedenäyttelyyn	4 hengen ryhmä
Reiner & Gilbert	2000b	Epistemological resources for thought experimentation in science learning	Israel	9 viimeisen vuoden fysiikanopettajaopiskelijaa ja 5 valmistunutta biologian opettajaa	Ongelmanratkaisutehtävien kollaboratiivinen suorittaminen, kirjalliset vastaukset	3 ja 5 hengen ryhmät
Özdemir	2009	Avoidance from Thought Experiments: Fear of misconception	Turkki	5 valmistunutta fysiikan opettajaa	Fysiikan ongelmanratkaisutehtäviä, joissa sanallistetaan puhumalla omaa ajatteluaan, tarkentavia kysymyksiä jälkikäteen	Yksilöllinen

Luotujen ajatuskokeiden tutkimuksista nousseet tulokset luokiteltiin viiteen alaluokkaan. Nämä olivat luotujen ajatuskokeiden tavoitteet, luotujen ajatuskokeiden piirteet, luotuihin ajatuskokeisiin käytetyt resurssit, kollaboratiiviset ajatuskokeet sekä ajatuskokeen ja empiirisen kokeen vastavuoroisuus.

Kuudenneksi alaluokaksi muodostui vielä osallistujien akateeminen kokemus, minkä perusteella osallistujien suorittamia ajatuskokeita myös tarkasteltiin. Tutkimusten osallistujat jaettiin akateemisen kokemuksen perusteella kahteen ryhmään, jotka olivat tutkimustulostensa perusteella samankaltaiset. Ensimmäiseen ryhmään kuuluivat maisterivaiheen opiskelijat, tohtorikoulutettavat sekä yliopistosta valmistuneet ja toiseen ryhmään kuuluivat kandidaattivaiheen opiskelijat sekä lukiolaiset. Aineiston luokittelu on havainnollistettu Taulukossa 5.

Taulukko 5. Aineiston luokittelu

Pääloukka	Yläluokka	Alaluokka	
Empiiriset ajatuskoetutkimukset	Annettujen ajatuskokeiden tutkimukset	Suhteellisuusteoreettiset ajatuskokeet	
		Kvanttimekaaniset ajatuskokeet	
		Klassisen mekaniikan ajatuskokeet	
	Luotujen ajatuskokeiden tutkimukset		Luotujen ajatuskokeiden tavoitteet
			Luotujen ajatuskokeiden piirteet
			Ajatuskokeiden luomiseen käytetyt resurssit
			Kollaboratiiviset ajatuskokeet
			Empiiristen kokeiden ja ajatuskokeiden vastavuoroisuus
			Akateemisen kokemuksen merkitys

Kuten taulukoista 3 ja 4 nähdään, tarkasteltavat ajatuskokeiden opetuskäytön hyödyntämistä koskevat empiiriset tutkimukset on toteutettu vuosina 1998–2020. Yleisimmät toteutusmaat olivat Kreikka (n = 4), Turkki (n = 4), Israel (n = 3) ja Indonesia (n = 3), mutta yhdet tutkimukset oli toteutettu myös Suomessa ja Norjassa. Tutkimusten empiirinen osuus on

toteutettu osallistujien toimesta joko yksilöllisesti tai ryhmissä. Ryhmissä toteutusta on suosittu hieman yksilöllistä enemmän. Annettujen ajatuskokeiden tutkimusten empiirisistä osista neljä oli toteutettu ryhmässä ja kolme lähtökohtaisesti yksilöllisesti, mutta Myhrehagen & Bungum (2016) antoivat myös mahdollisuuden vastata kysymyksiin pareittain. Luotujen ajatuskokeiden tutkimusten empiirisistä osista kuusi oli toteutettu ryhmissä ja kolme yksilöllisesti.

Lukiolaisia koskevista tutkimuksista suurin osa (5/7) lukeutui annettujen ajatuskokeiden ryhmään, kun taas yliopisto-opiskelijoita tutkivista tutkimuksista useimmat (7/8) lukeutuivat luotujen ajatuskokeiden ryhmään. Yläkouluikäisiä oli tutkittu vain kahdessa tutkimuksessa, joista toinen lukeutui annetun ja toinen luotavan ajatuskokeen tutkimukseksi. Ajatuskokeiden roolit eri tutkimusjoukoilla on eritelty taulukossa 6.

Taulukko 6. Ajatuskokeiden roolien frekvenssit eri tutkimusjoukoilla

Tutkittavat	Ajatuskokeet annettuna	Ajatuskokeet luodaan
Yläkoululaiset	1	1
Lukiolaiset	5	2
Yliopisto-opiskelijat ja yliopistosta valmistuneet	1	7

4 Tulokset

4.1 Ajatuskokeiden käyttö luonnontieteiden opetuksen kontekstissa

Ajatuskokeita luonnontieteiden opetuksen kontekstissa oli tutkittu kahdella eri asetelmalla: annettujen konsensusajatuskokeiden ja niistä johdettujen tehtävien avulla, tai tutkimalla osallistujien ongelmanratkaisutehtävien aikana luomia ajatuskokeita. Annettujen konsensusajatuskokeiden tutkimuksissa yleisimpänä menetelmänä toimi ajatuskokeiden sisältöihin liittyvä opetushetki tai ajatuskokeiden ohjattu suorittaminen, jonka jälkeen osallistujat vastasivat kirjallisesti kysymyksiin ajatuskokeiden sisältöihin liittyen. Nämä kysymykset esitettiin joko heti opetuskerran perään tai jopa kaksi viikkoa sen jälkeen. Osallistujat suorittivat tehtävät joko yksilöllisesti tai ryhmässä.

Osallistujien luomia ajatuskokeita tutkittiin havainnoimalla heitä ongelmanratkaisutehtävien aikana. Tutkimusten osallistujia usein myös haastateltiin ongelmanratkaisusessioiden jälkeen tai heitä pyydettiin sanallistamaan omaa ajatteluaan niiden aikana. Ongelmanratkaisutehtävät suoritettiin joko yksilöllisesti tai ryhmässä, joista jälkimmäinen toteutustapa oli suositumpi.

Ajatuskokeen rooliin näytti vaikuttavan tutkimusjoukko. Annettujen konsensusajatuskokeiden tutkimuksissa tutkittiin enimmäkseen lukioikäisiä, kun taas luotujen ajatuskokeiden tutkimuksessa yleisin osallistujaryhmä oli yliopisto-opiskelijat ja yliopistosta valmistuneet.

4.2 Hyödynnetyt ajatuskokeet ja niiden avulla saavutetut oppimistulokset

Annettuina ajatuskokeina hyödynnettiin teoriapohjaltaan kolmenlaisia ajatuskokeita: suhteellisuusteoreettisia, kvanttimekaanisia ja klassisen mekaniikan ajatuskokeita, joten kaikki annetut konsensusajatuskokeet pohjautuivat fysiikan teorioihin. Tarkastellaan seuraavaksi näiden ajatuskokeiden oppimistuloksia.

4.2.1 Suhteellisuusteoreettiset ajatuskokeet

Suhteellisuusteoreettisten ajatuskokeiden havaitut oppimistulokset olivat positiivisia. 9.-luokkalaiset osasivat ennustaa Einsteinin hissi -ajatuskokeen tapahtumat, vaikka he eivät aina osanneetkaan käyttää täsmällisiä tieteellisiä käsitteitä. Ajatuskokeen suorittaminen auttoi heitä kuitenkin ymmärtämään keskeiset käsitteet riittävällä tasolla. (Velentzas, Halkia & Skordoulis 2007.) Einsteinin hissistä johdetut kysymykset auttoivat myös lukiolaisia ymmärtämään ekvivalenssiperiaatetta ja Einsteinin painovoimateoriaa (Dua, HarraHau & Elizabeth 2020).

Se auttoi lukiolaisia hahmottamaan painottomuutta, johon liittyen he osasivat tehdä johtopäätökset itsenäisesti. Einsteinin hissi -ajatuskokeen läpikäynnin jälkeen lukiolaiset osasivat muotoilla ekvivalenssiperiaatteen omin sanoin ja osasivat antaa esimerkkejä siihen liittyvistä ilmiöistä, kuten esimerkiksi valon taipumisen painovoimakentässä, vaikka itse käsitettä ”ekvivalenssiperiaate” käytti selityksissään vain puolet. (Velentzas & Halkia 2013b.)

Iso osa lukiolaisista osasi suorittaa Einsteinin juna -ajatuskokeen ja sen avulla päätellä samanaikaisuuden suhteellisuuden, aikadilataation ja pituuskontraktion, vaikka heidän ennakkokäsityksensä olivatkin toisenlaiset. Ennen ajatuskokeen suorittamista lukiolaiset kuvittelivat kaikkien tapahtumien olevan jokaiselle havainnoijalle samanaikaisia ja aikadilataation johtuvan vain kellojen vajavaisuudesta. Ajatuskokeen suorittamisen jälkeen suurin osa heistä osasi kuitenkin antaa valonnopeuteen perustuvia esimerkkejä samanaikaisuuden suhteellisuudesta ja soveltaa aikadilataatiota sekä pituuskontraktiota. Lukiolaiset tulivat johtopäätökseen, jonka mukaan painovoimakentän ulkopuolinen kiihdyttäminen imitoi painovoimaa, mikä juuri on ekvivalenssiperiaatteen keskeinen sanoma. (Velentzas & Halkia 2013b.)

Arkikokemukset auttoivat lukiolaisia ajatuskokeiden visualisoinnissa, mutta hankaloittivat niiden seurausten hyväksymistä varsinkin, jos ne olivat ristiriidassa omien kokemusten kanssa. Nämä ongelmat saatiin kuitenkin ratkaistua keskustelemalla, minkä lisäksi epäformaaleista lähteistä saadut aikaisemmat tiedot auttoivat myös hyväksymään ajatuskokeiden seuraukset. (Velentzas & Halkia 2013b.) Yleinen koulumenestys ei myöskään ennustanut 9.-luokkalaisten ajatuskokeista suoriutumista, vaan joskus keskiverto-oppilas vastasi kysymyksiin jopa paremmin kuin edistynyt oppilas (Velentzas, Halkia & Skordoulis 2007).

4.2.2 Kvanttimekaaniset ajatuskokeet

Kvanttimekaanisten ajatuskokeiden oppimistulokset olivat moninaisempia. Heisenbergin mikroskooppi -ajatuskokeen populaariversio helpotti epätarkkuusperiaatteen opettamista ja auttoi oppilaita ymmärtämään sitä. Ajatuskokeen populaariversion avulla lukiolaiset pystyivät seuraamaan opetusta ja keskittymään nimenomaan epätarkkuusperiaatteen fysikaaliseen merkitykseen ilman tarvittavaa kvanttimekaanista tai matemaattista taustaa. Ajatuskokeen jälkeen lukiolaiset osasivat johtaa epätarkkuusperiaatteen kaavan ja vastata oikein olennaisiin kysymyksiin. He ymmärsivät epätarkkuusperiaatteen olevan luonnonperiaate, joka ei johdu koelaitteiston puutteista. Ajatuskokeen seurauksena lukiolaisten aikaisemmat virheelliset

käsitykset korjaantuivat ja he osasivat myös perustella uudet oikeat näkemyksensä. Lisäksi he osasivat soveltaa epätarkkuusperiaatetta useissa mikro- ja makrotason tapauksissa, joiden avulla he päättelivät oikein epätarkkuusperiaatteen vaikuttavan vain mikrotason ilmiöihin. (Velentzas & Halkia 2011.)

Kaksoisrakoajatuskokeesta saatiin hieman ristiriitaisia tuloksia. Vain pieni osa (4/27) tutkimukseen osallistuvista fysiikanopettajaopiskelijoista ja valmistuneista fysiikan opettajista pystyi kuvailemaan ajatuskokeen perusolettamukset oikein. Osa myös epäonnistui ajatuskokeessa, vaikka perusolettamukset olivatkin olleet oikein. Modernia fysiikkaa lukiassa opettaneet opettajat suoriutuivat mahdollisista virhekäsityksistään huolimatta paremmin kaksoisrakoajatuskokeesta kuin opettajaopiskelijat tai kokemattomat opettajat. Osallistujien oikeiden tulosten ja oikeiden johtopäätösten välillä ei kuitenkaan vaikuttanut olevan yhteyttä. Oikeat tulokset eivät aina johtaneet oikeisiin päätelmiin kokeen fysikaalisesta merkityksestä, kun taas osa oikeita johtopäätöksiä tehtiin väärin tulosten pohjalta. (Asikainen & Hirvonen 2014.)

Lukiolaisilla teetetty tutkimus Schrödingerin kissa -ajatuskokeesta tuotti myös erilaisia tuloksia. Lukiolaiset tulkitsivat ajatuskokeen monilla eri tavoilla, joista osa oli linjassa fyysikoiden tulkintojen kanssa, mutta monet heistä jättivät kuitenkin ajatuskokeen kannalta tärkeimmät seikat huomioimatta. Myhrehagenin ja Bungumin mukaan Schrödingerin kissa toimii esimerkkinä siitä, miten modernin fysiikan tiukka formalismi on avoin erilaisille tulkinnoille ja argumenteille. (Myhrehagen & Bungum 2016.)

4.2.3 Klassisen mekaniikan ajatuskokeet

Yhdessä tutkimuksessa annettuna ajatuskokeena toimi klassiseen mekaniikkaan perustuva Newtonin kanuuna. Lukiolaiset pystyivät kyseisen ajatuskokeen avulla muokkaamaan omia virheellisiä käsityksiään maan painovoimakenttään liittyen, luomaan mentaalisesti arkikokemusten ulkopuolisen fysikaalisen systeemin ja suorittamaan mentaalisen simulaation, jonka avulla he saavuttivat perustellusti oikean johtopäätöksen. Ajatuskokeen suorittamisen jälkeen he myös ymmärsivät samojen fysiikan lakien koskevan sekä taivaankappaleita että maan pinnalla olevia kappaleita. Lukiolaisten oli jälleen aluksi vaikeaa hyväksyä arkikokemustensa kanssa ristiriidassa olevat tulokset. Tähän kuitenkin auttoi heidän keskinäinen kommunikaationsa ja uudelleen suoritettu ajatuskoe, jota hieman muokattiin opettajan suositusten mukaisesti. (Velentzas & Halkia 2013a.)

4.3 Luonnontieteiden opetuksen kontekstissa luodut ajatuskokeet

Lähes kaikissa tutkimuksissa, joissa tarkasteltiin osallistujien ongelmanratkaisuprosesseja, havaittiin osallistujien suorittavan ainakin osittaisia ajatuskokeita. Fysiikanopettajaopiskelijat ja valmistuneet biologian opettajat loivat kuvitteellisia maailmoja, jotka koostuivat oikeaan maailmaan viittaavista piirteistä. Nämä maailmat linkittyivät myös ajatuskokeen suorittajan aikaisempaan tietoon ja kokemuksiin. (Reiner & Gilbert 2000b.)

Osittaisia ajatuskokeita luotiin ongelmanratkaisutehtävissä myös lukiolaisten toimesta. He loivat niin sanottuja mikromaailmoja, mutta niitä tarkasteltiin päämäärättömästi.

Hypoteesejakin annettiin, mutta niitä ei testattu. Jos hypoteeseja testattiin, niin tulokset tai johtopäätökset ohitettiin. Yleisin lukiolaisten suorittamista ajatuskokeista puuttuva osa oli juurikin johtopäätökset. Strukturoidut ajatuskokeet eivät kuitenkaan olleet sattumanvaraisia, vaan vallitsevia tapahtumia, vaikka niistä joskus puuttuikin yksi tai kaksi kaikista viidestä komponentista. (Reiner 1998.)

Luotujen ajatuskokeiden tutkimukset antoivat tietoa myös luotujen ajatuskokeiden erilaisista piirteistä ja niissä hyödynnetyistä resursseista. Aineistosta nousi myös kaksi ajatuskoetyyppiä: kollaboratiivisesti luodut ja empiiristen kokeiden aikana suoritettavat ajatuskokeet.

4.3.1 Luotujen ajatuskokeiden piirteet

Kösem & Özdemir (2014) jakoivat fysiikan tohtorikoulutettavien, kandidaattivaiheen opiskelijoiden ja lukiolaisten luodut ajatuskokeet niiden luonteiden puolesta kahteen pääluokkaan, jotka olivat muuttujien manipulointi ja kappaleiden muuntelu. Kumpikin pääluokka jakaantui vielä kahteen alaluokkaan. Muuttujien manipulointi jakaantui rajoittavaan ja äärimmäiseen tapaukseen, kun taas kappaleiden muuntelu jakaantui yksinkertaistettuun ja tuttuun tapaukseen. (Kösem & Özdemir 2014.)

Muuttujien manipuloinnilla tarkoitetaan alkuperäisen ongelmatilanteen muuttujien tarkoituksellista manipulointia niin, että tilanteen kappaleet pysyvät muuttumattomina. Rajoittavassa tapauksessa vähintään yksi alkuperäisen ongelmatilanteen muuttuja on suljettu tarkoituksella kokonaan pois tai sen vaikutusta on ainakin osittain pienennetty.

Äärimmäisessä tapauksessa vähintään yhden alkuperäisen ongelmatilanteen muuttujan vaikutus on maksimoitu. (Kösem & Özdemir 2014.)

Kappaleiden muuntelulla tarkoitetaan alkuperäisen ongelmatilanteen kappaleiden muuttamista niin, että tilanteen muuttajat pysyvät muuttumattomina. Yksinkertaistetussa tapauksessa alkuperäisen ongelmatilanteen kappaleita muutetaan, jotta saadaan helpommat olosuhteet vastauksen päättelylle. Tutussa tapauksessa alkuperäisen ongelmatilanteen kappaleet muutetaan niin, että saadaan tutummat ja tunnistettavammät olosuhteet. (Kösem & Özdemir 2014.)

4.3.2 Luotujen ajatuskokeiden resurssit

Ajatuskokeiden luomiseen käytettiin monenlaisia resursseja. Yleisimpänä käytettynä resurssina mainittiin hiljainen tieto (engl. *tacit knowledge*) (Bancong & Song 2020a; Kösem & Özdemir 2014; Reiner & Gilbert 2004; Reiner & Gilbert 2000b) tai vastaavasti aikaisempi tieto (engl. *prior knowledge*) (Bancong & Song 2020b). Esimerkiksi biologian opettajilla oli fysikaalisten ongelmien ratkaisuun liittyen hiljaista, esimerkiksi kehollista, tietoa arkikokemusten pohjalta ilman formaaliakin tietoa, jota fysiikanopettajaopiskelijat pystyivät myös hyödyntämään. Verbaalisissa esityksissä huomiotta jäävään tietoon päästäänkin käsiksi juuri ajatuskokeille ominaisissa kuvitelluissa tilanteissa. (Gilbert & Reiner 2000b.)

Kösem ja Özdemir (2014) jakoivat fysiikan opiskelijoiden ja lukiolaisten ajatuskokeisiin käytetyt resurssit kolmeen kategoriaan: havaittuihin ja koettuihin faktoihin, intuitiivisiin periaatteisiin, ja tieteellisiin käsitteisiin. Havaittuina ja koettuina faktoina toimivat aiemmat arkikokemukset, kun taas intuitiiviset periaatteet ovat arkikokemuksista luotuja abstraktioita, jotka toimivat tietynlaisina arkihavaintojen yleistyksinä. (Kösem & Özdemir 2014.)

Bancong ja Song (2020a) puolestaan erittelivät neljä hieman vastaavaa näkökulmaa, joista fysiikanopettajaopiskelijat arvioivat suoritettujen ajatuskokeiden oikeellisuutta: käsitteellinen ymmärrys, aikaisemmat kokemukset, looginen päättely ja käsitteellis-looginen päättely. Käsitteellisellä ymmärryksellä viitataan ymmärrykseen fysiikan käsitteistä, yhtälöistä ja laeista. Aikaisemmilla kokemuksilla viitataan juuri aikaisempiin henkilökohtaisiin arkikokemuksiin. Käsitteellis-looginen päättely yhdistää fysiikan lait ja käsitteet sekä loogisen manipuloinnin, kun taas pelkässä loogisessa päättelyssä puuttuvat viittaukset fysiikan lakeihin ja käsitteisiin. Ajatuskoeprosessia ja sen tuloksia voidaan arvioida useampaan kertaan eri tavoin esimerkiksi ensin käsitteellisen ymmärryksen ja sen jälkeen aikaisempien kokemusten kautta. (Bancong & Song 2020a.)

4.3.3 Kollaboratiiviset ajatuskokeet

Fysiikanopettajaopiskelijat loivat ajatuskokeita myös kollaboratiivisesti, vaikka niitä onkin pidetty pääasiassa luonteeltaan yksilöllisinä. Niitä voitiin jakaa, muotoilla uudelleen, arvioida, muokata yhdessä ja kaksi tai useampi ajatuskokeen suorittaja voivat päästä samaan lopputulokseen. (Bancong & Song 2020a.) Reinerin ja Gilbertin (2000b) tutkittavien välinen kommunikaatio viittasi myös ryhmänä jaettuun kuvitteelliseen maailmaan (Reiner & Gilbert 2000b).

Kollaboratiivista oppimista tapahtui jaettujen ajatuskokeiden avulla myös lukiolaisten kesken. Nämä ajatuskokeet syntyivät kollaboratiivisen ongelmanratkaisun seurauksena.

Kollaboratiivisen ryhmän jokainen jäsen toi oman osittaisen panoksensa, jota yksinään ei luokiteltaisi tai ollut edes tarkoitettu ajatuskokeeksi. Ryhmässä näistä osista kuitenkin muodostui ajatuskokeita. Aluksi lukiolaiset hyödynsivät ongelmanratkaisussa tietokonesimulaatio-ohjelmaa, mutta sen avulla luodut visuaaliset konstruktiot korvattiin ongelmanratkaisuprosessin aikana jaetuilla ja kommunikoiduilla mentaalisilla kuvantamisilla ja konstruktioilla. Lukiolaiset kuvittelivat yhdessä samanlaisia tilanteita, joihin liittyen he pystyivät kommunikoimaan ilman näkyvää kuvitusta. (Reiner 1998.)

Bancong ja Song (2020a) antoivatkin havaintojensa pohjalta määritelmän kollaboratiiviselle ajatuskokeelle. Heidän mukaansa kollaboratiivisessa ajatuskokeessa visualisoidaan kuvitteelliset maailmat, joissa kokeet suunnitellaan ja ne suoritetaan yhden tai useamman yksilön toimesta heidän omissa ”mielen laboratorioissaan”, jonka jälkeen suoritettujen ajatuskokeiden jaetaan ryhmän jäsenille yhteisesti suoritettaviksi ja arvioitaviksi, jotta päästään yhteiseen lopputulokseen. Kollaboratiivinen ajatuskoe jaetaan viiteen osaan: 1. kuvitteellisten maailmojen visualisointi, 2. ajatuskokeiden suorittaminen, 3. tulosten kuvailu, 4. ajatuskokeiden jakaminen ja arviointi, 5. johtopäätösten tekeminen. (Bancong & Song 2020a.)

Ince ym. (2016) tutkivat fysiikan kandidaattivaiheen opiskelijoiden kollaboratiivisissa ryhmissä muodostamia ajatuskokeita. Opiskelijaryhmillä oli seitsemän viikkoa aikaa muodostaa ryhmän kesken ongelma, jonka he ratkaisivat ajatuskokeen avulla.

Ajatuskoeoprosessin aikana sai hakea taustatietoa eri lähteistä. Prosessin aikana opiskelijat toivat omia ajatuksiaan, kuvitelmiään ja mallejaan osaksi kollaboratiivista ongelmanratkaisua. Kollaboratiivisten ajatuskokeiden käyttö vaikutti olevan erittäin hyödyllistä, sillä ne auttoivat opiskelijoita ymmärtämään fysiikan käsitteistöä ja tarkasteltavia ilmiöitä. Ajatuskokeiden

menestyksekkäät suoritukset kielivät myös opiskelijoiden kehittyneistä ongelmanratkaisutaidoista. (Ince ym. 2016.)

4.3.4 Ajatuskokeiden ja empiirisen kokeen vastavuoroisuus

Reinerin ja Gilbertin (2004) mukaan empiirisiä kokeita suoritettaessa suoritetaan myös ajatuskokeita. Empiiristä ongelmaa ratkaistaessa vaihdellaan empiirisen kokeilun ja ajatuskokeiden välillä, joiden avulla päästään lähemmäs tieteellisesti hyväksyttyä käsitteistöä. He kutsuvat tätä prosessia vastavuoroiseksi projisoinniksi (engl. *mutual projection*). (Reiner & Gilbert 2004.)

Reiner ja Gilbert tarkkailivat yläkoululaisten vuorovaikutusta heidän suorittaessaan empiirisiä mekaniikan kokeita ja havaitsivat kolme mentaalisen konstruoinnin yhteenkietoutunutta vaihetta. Näitä olivat mekaanis-fyysisten suhteiden mentaalinen konstruointi, kuvaavan tilan mentaalinen konstruointi ja mielikuvituksellisten maailmojen mentaalinen konstruointi. (Reiner & Gilbert 2004.)

Mekaanis-fyysisten suhteiden mentaalisen konstruoinnin vaiheessa tarkasteltiin, mitä empiirisen kokeen systeemissä tapahtui. Tämä vaihe oli ilmiöön tutustumisen ensimmäinen askel, jossa yritettiin etenkin tunnistaa mekaanisen systeemin komponentit ja prosessit. (Reiner & Gilbert 2004.)

Toisena vaiheena oli kuvaavan tilan mentaalinen konstruointi, jossa luotiin verbaalinen ja kuvainnollinen kuvaus systeemin fysikaalisista tapahtumista. Yläkoululaisten havaittiin luottavan tässä kohdassa enemmän keksittyihin aistiperäisiin käsitteisiin kuin oikeisiin tieteellisiin käsitteisiin. Tässäkin vaiheessa pyrittiin edelleen tunnistamaan systeemin komponentit ja prosessit. (Reiner & Gilbert 2004.)

Viimeisenä vaiheena oli mielikuvituksellisten maailmojen mentaalinen konstruointi, jossa aiemmin luodut mentaaliset kuvaukset muutettiin ratkaisemaan ”Mitä, jos”-kysymyksiä eli suoritettiin ajatuskokeita. Yläkoululaiset keskustelivat kuvitteellisesta ilmiöstä ilman piirustuksia käyttäen yhteistä terminologiaa ja havainnollistavaa kehonkieltä käsillään. He suorittivat ajatuskokeet kollaboratiivisesti mielissään ilman ulkoista kontrollia, saivat tulokset, joista vetivät johtopäätökset, joita osasivat vielä soveltaa. Sekä näkyvät että näkymättömät kappaleet olivat keskustelujen perusteella ”näkyviä” kuvitellussa maailmassa. (Reiner & Gilbert 2004.)

4.4 Luotujen ajatuskokeiden syyt ja tavoitteet

Kaikki Bancongin ja Songin (2020a) sekä Kösemin ja Özdemirin (2014) tutkimuksiin osallistuneet suorittivat ajatuskokeen ainakin kerran. Ne syntyivät spontaanina reaktiona ratkaistavaan ongelmaan eivätkä niiden suoritusmäärät juurikaan vaihdelleen tasoryhmien välillä (Bancong & Song 2020a; Kösem & Özdemir 2014.) Kösem ja Özdemir (2014) sanovatkin tämän perusteella ajatuskokeen olevan yksi päättelytyökalu fyysikaalisten tilanteiden ymmärtämisessä kaiken tasoilla osallistujilla (Kösem & Özdemir 2014).

Valmistuneiden fysiikan opettajien havaittiin enemmän tietoisesti välttelevän ajatuskokeille välttämättömien mentaalisten simulaatioiden käyttöä kuin käyttävän niitä päättelytyökaluina ongelmanratkaisussa. He eivät kuitenkaan pystyneet pysäyttämään mentaalisten simulaatioiden aktivoitumista, vaan irrottivat ne formaalista fysiikan tietämyksestä, koska he eivät uskoneet niiden olevan varteenotettava työkalu tieteelliseen päättelyyn. (Özdemir 2009.) Edes ajatuskokeiden tietoisella välttelylläkään ei siis pystytä kokonaan pysäyttämään ajatuskoeprosessin syntymistä.

Ajatuskokeiden luomiselle havaittiin olevan kolme tavoitetta: ennustus, todistus ja selitys (Bancong & Song 2020b; Kösem & Özdemir 2014). Ennustuksessa luotiin hypoteesi ongelman ratkaisulle ajatuskokeen avulla. Todistuksessa tarkistettiin muutoin kuin ajatuskokeella luodun hypoteesin oikeellisuus ajatuskokeen avulla. Selityksessä käytettiin ajatuskoetta selittämään annettu ennustus tai vastaus. (Kösem & Özdemir 2014.)

4.5 Akateemisen kokemuksen vaikutus ajatuskoeprosesseihin

Luotujen ajatuskokeiden tutkimusten pohjalta osallistujat voitiin jakaa kahteen ryhmään akateemisen kokemuksen perusteella. Ensimmäisessä ryhmässä olivat maisterivaiheen opiskelijat, tohtorikoulutettavat ja yliopistosta valmistuneet. Toiseen ryhmään kuuluivat kandidaattivaiheen opiskelijat ja lukiolaiset. Vaikka näiden ryhmien välillä oli eroavaisuuksia, myös yhtäläisyyksiä löytyi.

Sekä ensimmäisen että viidennen vuoden fysiikanopettajaopiskelijat loivat ajatuskokeita, joilla oli sekä konstruktivisia että destruktiivisia piirteitä (Bademci & Sari 2014).

Ajatuskokeiden tavoitteissa ja luonteissa havaittiin ryhmien välillä myös yhtäläisyyksiä. Lukiolaisten, kandidaattivaiheen fysiikan opiskelijoiden ja fysiikan tohtorikoulutettavien luomien ajatuskokeiden yleisin tavoite oli johtopäätösten selitys ja kaikissa ryhmissä

käytettiin sekä kappaleiden muokkaamista että muuttujien manipulointia omien ajatustensa selittämiseen (Köseme & Özdemir 2014). Myös suurin osa kandidaattivaiheen fysiikanopettajaopiskelijoista ja valmistuneista fysiikanopettajista koostuvan sekaryhmän luomista ajatuskokeista oli tavoitteeltaan selittäviä, ja loput olivat todistavia (Bancong & Song 2020b).

4.5.1 Maisterivaiheen opiskelijat, tohtorikoulutettavat ja valmistuneet

Viidennen vuoden fysiikanopettajaopiskelijat lähestyivät ratkaistavia ongelmia useista eri näkökulmista ja olivat ensimmäisen vuoden opiskelijoihin verrattuna tehokkaampia ajatuskokeiden luomisessa ja suorittamisessa. Heidän ajatuskokeissaan oli platonisten ajatuskokeiden piirteitä, sillä ne olivat sekä konstruktivisia että destruktiivisia. He hylkäsivät mielestään virheelliset kuvitteelliset tilanteet ja korvasivat ne uusilla uskottavammilla teorioilla. (Bademci & Sari 2014.) Tohtorikoulutettavat käyttivät luomiensa ajatuskokeiden resursseina pelkästään tieteellisiä käsitteitä (Köseme & Özdemir 2014) ja maisterivaiheenkin fysiikanopettajaopiskelijat arvioivat suorittamiaan ajatuskokeitaan enimmäkseen käsitteellis-loogisen ja loogisen päättelyn kautta (Bancong & Song 2020a).

Tohtoriopiskelijat hyödynsivät kaikkia ajatuskokeen eri piirteitä. He useimmiten manipuloivat muuttujia äärimmäisyyksiin tai rajoittivat niitä ideaalien olosuhteiden saavuttamiseksi. Heillä oli tapana myös muokata kappaleita luodakseen joko yksinkertaistettuja tai tuttuja tapauksia ajatuskoeprosessin aikana. (Köseme & Özdemir 2014.) Puolet valmistuneiden fysiikan opettajien suorittamista ajatuskokeista oli selittäviä eli he pyrkivät selittämään antamaansa vastausta muodostetun ajatuskokeen avulla. He ensin esittivät aikaisempaan tietoonsa perustuvia hypoteeseja ja oletuksia, jonka jälkeen he suunnittelivat ja toteuttivat ajatuskokeita selittämään hypoteeseja yksityiskohtaisesti. (Bancong & Song 2020b.)

4.5.2 Kandidaattivaiheen opiskelijat ja lukiolaiset

Ensimmäisen vuoden fysiikanopettajaopiskelijat loivat enemmän konstruktiviseksi luokiteltuja ajatuskokeita. He saivat kuitenkin ajatuskokeistaan ristiriitaisia tuloksia, joihin he eivät luottaneet. (Bademci & Sari 2014.) Kandidaattivaiheen fysiikan opiskelijat ja lukiolaiset ovat taipuvaisia vain yksinkertaistamaan alkuperäisen ongelman olosuhteita tai kuvailemaan analogisia tilanteita tuttuun tapausten avulla. He eivät vaikuttaneet olevan tottuneet muuttujien manipulointiin, sillä vain yksi kandidaattivaiheen opiskelija hyödynsi muuttujien manipulointia ajatuskoeprosessin aikana. (Köseme & Özdemir 2014.) Ensimmäisen vuoden

fysiikanopettajaopiskelijat yrittivät saada ongelmanratkaisutehtävistä merkityksellisiä ennen ajatuskokeiden suorittamista ja he loivatkin parempia kuvitteellisia ympäristöjä viidennen vuoden opiskelijoihin verrattuna (Bademci & Sari 2014).

Lukiolaiset ja kandidaattivaiheen fysiikan opiskelijat käyttivät intuitiivisia periaatteita ja havaittuja faktoja ajatuskokeidensa resursseina. Kandidaattivaiheen opiskelijat viittasivat myös tieteellisiin käsitteisiin, mutta pääasiassa he käyttivät edellä mainittuja resursseja. Vastaustensa oikeuttamiseen kandidaattivaiheen fysiikan opiskelijat käyttivät tuttuja tapauksia. (Kösem & Özdemir 2014.) Kandidaattivaiheen fysiikanopettajaopiskelijatkin arvioivat ajatuskokeitaan lähinnä aikaisempien kokemustensa tai loogisen päättelyn kautta (Bancong & Song 2020a).

Valtaosa kandidaattivaiheen fysiikan opiskelijoiden ja lukiolaisten ajatuskokeista oli ongelman ratkaisun ennustavia tai todistavia. Ennustukset olivat yleisimpiä lukiolaisilla, kun taas todistukset olivat yleisimpiä kandidaattivaiheen opiskelijoilla. (Kösem & Özdemir 2014.) Suurin osa kandidaattivaiheen fysiikanopettajaopiskelijoidenkin suorittamista ajatuskokeista oli ennustavia. Heillä ei ollut hypoteeseja tai olettamuksia alustavaksi vastaukseksi, vaan he suoraan visualisoivat kuvitteellisen maailman ja suunnittelivat ajatuskokeen ongelmaa ratkaistessaan. Saatua ajatuskokeen tulosta käytettiin ongelman ratkaisuna. (Bancong & Song 2020b.)

5 Pohdinta

Tämän tutkielman tarkoituksena oli tarkastella ajatuskokeiden hyödyntämistä luonnontieteiden opetuksen kontekstissa. Menetelmäksi valikoitui Finkin (2005) mallia mukaillen toteutettu systemaattinen kirjallisuuskatsaus, jossa aineisto analysoitiin aineistolähtöisellä sisällönanalyysillä (Fink 2005; Tuomi & Sarajärvi 2009).

Ajatuskokeiden käyttöä luonnontieteiden opetuskontekstissa on tutkittu empiirisesti kahdesta näkökulmasta. Ensimmäisenä annettujen konsensusajatuskokeiden tai niistä johdettujen tehtävien avulla. Näiden tutkimusten yleisimpänä toteutusmenetelmänä on ollut mahdollinen esitietojen testaus ja ajatuskokeeseen tutustuttavat opetuskerrat, jonka jälkeen osallistujat suorittavat jonkinlaisen kirjallisen testin joko yksilöllisesti tai ryhmässä. Heidän työskentelyään usein myös havainnoitiin suorituksen aikana. Toisena näkökulmana tutkittiin ajatuskokeiden muodostamista ongelmanratkaisutehtävien aikana. Osallistujia tyypillisesti havainnoitiin suorituksen aikana, minkä lisäksi heitä usein joko haastateltiin jälkepäin tai pyydettiin sanallistamaan omaa ajatteluaan. Nämä tutkimukset toteutettiin useammin ryhmissä, mutta myös yksilöllisiä suorituksia tarkasteltiin.

Opetustilanteisiin valittiin ainoastaan fysiikan ajatuskokeita. Nämä jaettiin teoriapohjan mukaan suhteellisuusteoreettisiin, kvanttimekaanisiin ja klassisen mekaniikan ajatuskokeisiin. Suhteellisuusteoreettisista ajatuskokeista oli valikoitunut Einsteinin juna ja Einsteinin hissi, joka oli suosituin ajatuskoe esiintymällä kolmessa eri tutkimuksessa. Kvanttimekaanisiksi ajatuskokeiksi oli valikoitunut Schrödingerin kissa, kaksoisrakoajatuskoe ja Heisenbergin mikroskooppi. Yhdessä tutkimuksessa oli käytetty klassisen mekaniikan Newtonin kanuuna - ajatuskoea. Einsteinin hissiä lukuun ottamatta kaikki muut ajatuskokeet esiintyivät aineistossa vain kerran.

Tietokannoista ei löytynyt tutkimuksia, joiden ajatuskokeiden teoriapohja olisi ollut muualla kuin fysiikassa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, ettei ajatuskokeilla ole ollut muissa luonnontieteissä yhtä vahvaa historiallista perinnettä. Ajatuskokeita voidaan kuitenkin toteuttaa fysiikan lisäksi muissakin luonnontieteissä (Moue ym. 2006).

Ajatuskokeiden avulla saavutettiin pääsääntöisesti hyviä oppimistuloksia. Ajatuskokeet auttoivat osallistujia oppimaan niiden teoriataustaan liittyvät olennaiset käsitteet ja korjaamaan mahdollisia virhekäsityksiä. Keskustelu vertaisten tai opettajan kanssa auttoi virhekäsitysten purkamisessa. Arkikokemukset auttoivat ajatuskokeiden suorittamisessa,

mutta saattoivat hankaloittaa johtopäätösten hyväksymistä. Ajatuskoe myös voi epäonnistua, vaikka siihen liittyvät perusolettamukset olisivat oikein. Toisaalta ajatuskoe voi onnistua, vaikka perusolettamukset olisivatkin väärin. Ajatuskokeen suorituksen oikeellisuudella ja oikeilla johtopäätöksillä ei myöskään vaikuttanut olevan yhteyttä. Ajatuskoeprosessin edellisen vaiheen onnistuminen ei siis välttämättä takaa seuraavan vaiheen onnistumista tai päinvastoin edellisen vaiheen epäonnistuminen ei automaattisesti johda seuraavan epäonnistumiseen.

Useimmat lukiolaiset eivät sisäistäneet Schrödingerin kissa -ajatuskokeen olennaisimpia asioita. Oppilaat tulisikin tutustuttaa kyseisen ajatuskokeen historialliseen kontekstiin, jotta he voisivat täysin ymmärtää ajatuskokeen sanoman ja sen havainnollistaman kvanttimekaniikan filosofisen ulottuvuuden (Myhre & Bungum 2016). Historiallisten konsensusajatuskokeiden populaariversiot ovatkin hyödyllisiä työkaluja lukion fysiikan opetuksessa. Niiden kertomuksellinen luonne sekä metaforien ja analogien hyödyntäminen auttavat ajatuskokeiden suorittamisessa ilman riittävää fysikaalista tai matemaattista taustatietoa. (Velentzas & Halkia 2011.)

Ajatuskokeet itsessään eivät kuitenkaan takaa hyviä oppimistuloksia. Ajatuskokeita suorittaessa opettajien tulisi olla valmistautuneita auttamaan oppilaita hyväksymään heidän arkikokemuksiinsa ja maalaisjärkeensä pohjautuvat johtopäätökset, minkä lisäksi vertaistuki auttaa ajatuskoeprosessinsa kanssa vaikeuksissa olevia oppilaita (Velentzas & Halkia 2013b). Opettajat suhtautuvat myönteisesti ajatuskokeiden opetuskäyttöön, jos niiden avulla voidaan parantaa oppilaiden fysiikan käsitteellistä ymmärrystä (Bancong, Nurzami & Sirajuddin 2023).

Tutkimusten osallistajat loivat todellisiin maailmoihin perustuvia ajatuskokeita, jotka saattoivat olla myös osittaisia, jolloin osa ajatuskokeen suoritusvaiheista puuttui. Luoduissa ajatuskokeissa joko manipuloitiin muuttujia, muunneltiin kappaleita tai tehtiin molempia. Resursseina ajatuskokeiden luomiseen käytettiin hiljaista tietoa, havaittuja ja koettuja faktoja, intuitiivisia periaatteita ja tieteellisiä käsitteitä. Myös kaksi ajatuskoetyyppiä nousi esille luotujen ajatuskokeiden tutkimuksista. Ensimmäisenä kollaboratiiviset ajatuskokeet, joissa ryhmän yksittäisten jäsenten osittaiset kontribuutiot johtavat ajatuskokeen syntymiseen ja toisena empiirisen kokeen aikana tapahtuva vastavuoroinen projisointi, jolloin suoritetaan myös ajatuskokeita.

Kollaboratiiviset oppimistehtävät ovat opettajan kannalta tehokkaita, sillä ne tekevät oppilaan ajattelun näkyväksi. Oppilaiden yhteistyö mahdollistaa avoimet keskustelut ja väittelyt, jotka johtavat uusiin näkökulmiin. (Bancong, Nurzami & Sirajuddin 2023.) Ajatuskokeita syntyy herkemmin kollaboratiivisissa tilanteissa, joissa yksittäisten oppilaiden kontribuutiot voivat johtaa ajatuskokeeseen, vaikkei se olisi ollutkaan ryhmän yksilöiden tavoitteena (Reiner 1998). Bancong & Song (2020a) suosittelevatkin kollaboratiivisia ajatuskokeita sekä nykyisille että tuleville fysiikan opettajille hyödyllisenä työkaluna ajatuskokeiden opettamiselle. He antavat perusteluksi kolme syytä:

1. Ajatuskokeet voivat tuottaa sekä oikeita että väriä johtopäätöksiä. Tämä voidaan hyvinkin todennäköisesti välttää ja korjata kollaboratiivisten ajatuskokeiden kommunikaatiolla ja vertaisvuorovaikutuksella.
2. Oppilasta voidaan kollaboratiivisen ajatuskokeen antamalla vertaistuellia auttaa muodostamaan ajatuskokeita, jos hän ei pysty niitä itsenäisesti luomaan tai suorittamaan.
3. Ajatuskokeiden jako- ja arviointivaihe voi auttaa yksittäistä oppilasta kehittämään omaa ymmärrystään ja tieteellisiä argumentointitaitojaan. (Bancong & Song 2020.)

Ajatuskokeita luotiin spontaaneina reaktioina ongelmanratkaisutehtäviin. Edes tietoinen väittely ei estänyt ajatuskokeiden pohjana toimivia mentaalaisia simulaatioita. Luotujen ajatuskokeiden tavoitteena oli johtopäätösten ennustus, todistus tai selitys.

Oppilaiden ajatuskokeet eivät ole suunniteltuja toisin kuin tutkijoiden, vaan keskustelu vähitellen kehittyy ajatuskokeeksi (Reiner 1998; Bancong & Song 2020b). Syy ajatuskokeiden väittelylle voi Balukovicin ym. (2017) mukaan löytyä empiirisen tarkistuskokeen puutteesta. Jos tarkistuskoetta ei suoriteta, oppilailla ei ole mahdollisuutta huomata itse empiiristen kokeiden mahdollisesti kumoavan jotkin heidän ideansa. Sen sijaan, että oppilaat oppisivat ratkaisemaan ongelman sisäisen ajattelun sekä ulkoisen keskustelun ja havainnoinnin vuorovaikutuksessa, he saattavat syystäkin lopettaa autenttisen ajattelunsa ja odottaa, että heille kerrotaan oikea vastaus. (Balukovic ym. 2017.) Tämän vuoksi suoritettujen ajatuskokeiden tulisi aina käydä perusteellisesti läpi ja mahdollisuuksien mukaan suorittaa myös vahvistavat empiiriset kokeet.

Ajatuskokeiden vääjäämättömän luonteen vuoksi oppilaita tulisi enemmän ohjata niiden tehokkaaseen käyttöön kuin niiden tukahduttamiseen. Asikainen ja Hirvonen (2014)

suosittelevatkin, että ajatuskokeen vaiheet esiteltäisiin tuleville fysiikan opettajille höydyllisinä työkaluina ajatuskokeiden analysointiin. He suosittelivat myös vertaiskeskusteluja ajatuskokeiden opetuskäytössä yksittäisen opiskelijan ymmärryksen lisäämiseksi. Ajatuskokeiden sisällyttäminen opintoihin hyödyttäisi tulevia opettajia, jotka näkisivät ajatuskokeiden mahdollisuudet fysiikan opetuksessa. (Asikainen & Hirvonen 2014.)

Osallistujien ajatuskoeoprosessien yleisin tavoite oli johtopäätösten selitys. Osallistujaryhmien eroista voidaan tiivistettynä sanoa maisterivaiheen opiskelijoiden ja akateemisesti kokeneempien osallistujien suorittavan laadukkaita ajatuskokeita. Heidän ajatuskokeidensa päätavoitteena on kriittisesti selittää antamaansa teoriaan pohjautuvaa johtopäätöstä, mihin he käyttävät valideja resursseja sekä menetelmiä monipuolisesti ja tehokkaasti hyväkseen. Tutut tapaukset ja arkikokemukset ovat suuremmassa roolissa kandidaattivaiheen opiskelijoiden ja lukiolaisten ajatuskokeissa. Tähän ryhmään kuuluvat tutkittavat pyrkivät usein vain yksinkertaistamaan annetut ongelmat tai muuttamaan ne tutuiksi tilanteiksi. Näiden yksinkertaistusten avulla he pyrkivät luomaan ennustuksen ongelman ratkaisusta tai todistamaan sen. Saatua johtopäätöstä he arvioivat lähinnä omien kokemustensa tai loogisen päättelyn avulla.

Yleisesti voidaan sanoa, että ajatuskoe onnistuu todennäköisemmin, jos ajatuskokeen suorittajalla on olennaista tietoa todellisen maailman toiminnasta. Ajatuskokeen suorittaja voi ennustaa, miten hypoteettiset tilanteet etenevät vain, jos hänellä on joko eksplisiittistä tai implisiittistä tietoa oikeista ilmiöistä. ”Mitä jos”-kysymyksiin vastaaminen helpottuu käytettävän tiedon ollessa enemmän eksplisiittistä kuin implisiittistä. (Cooper 2005.) Kokeneemmat opiskelijat ovat todennäköisemmin törmänneet opintojensa aikana useammin tutkimuksissa käytettyjen ongelmanratkaisutehtävien kaltaisiin tilanteisiin, jolloin ne ovat valmiiksi tuttuja. Tämän vuoksi heillä on todennäköisemmin tehtävän teoriaan liittyvää eksplisiittistä tietoa, mikä johtaa laadukkaampiin ajatuskoeprosesseihin. Akateemisesti kokeneempien eksplisiittinen tieto voi selittää sen, miksi heidän ajatuskokeidensa tavoitteena ei ollut ennustus, vaan juurikin selitys.

Kokemattomien tieteenharjoittajien ajatuskokeiden vaillinaisuus liittyy heidän rajalliseen formaaliin tietoonsa. He etsivät tilanteista usein pinnallisia samankaltaisuuksia, jolloin havainnot ovat todennäköisemmin epäolennaisia ja oikeiden johtopäätösten tekeminenkin hankaloituu. (Reiner & Burko 2003.) Todennäköisesti tästä syystä annettuja konsensusajatuskokeita käytettiin useammin lukiolaisten tutkimiseen, kun taas yliopisto-

opiskelijoiden ja yliopistosta valmistuneiden tutkimisessa tarkasteltiin heidän ongelmanratkaisutehtävien aikana itse luomiaan ajatuskokeita. Akateemisesti kokeneemmilla osallistujilla on paremmat valmiudet suorittaa ajatuskokeita, jolloin niiden luonteesta saadaan enemmän tietoa.

5.1 Luotettavuus ja tutkimuseetiikka

Tämän kirjallisuuskatsauksen luotettavuutta voidaan tarkastella menetelmän, tutkijan ja aineiston näkökulmasta. Menetelmän luotettavuuden lisäämiseksi katsaus suoritettiin mukaillen valmista Finkin (2005) mallia, joka sisälsi systemaattisen kirjallisuuskatsauksen toteuttamiseen vaadittavat vaiheet.

Tutkijaan liittyvää luotettavuutta paransi systemaattisen mallin hyödyntäminen. Tutkijan toiminta perustui valmiiseen malliin, jonka pohjalta tutkimusprosessi eteni. Tämä prosessi on myös avattu menetelmäosiossa. Toisaalta katsauksen suoritti vain yksi tutkija. Toisen tai useamman tutkijan osallistuminen katsausprosessiin olisi pienentänyt inhimillisten virheiden mahdollisuuksia ja parantanut tutkimuksen luotettavuutta. Tutkijan kokemattomuus systemaattisen kirjallisuuskatsauksen suorittajana vaikutti mahdollisesti myös negatiivisesti katsauksen luotettavuuteen.

Aineiston luotettavuus pyrittiin maksimoimaan täsmällisillä hyväksymiskriteereillä. Tietokannat ja käytännön seurat valittiin niin, että aineistosta saataisiin mahdollisimman laaja ja laadukas. Toisaalta kielen rajausta englantiin, ja kriteeri koko tekstin saatavuudesta verkossa, saattoivat johtaa vartenotettavien tutkimusten hylkäämiseen. Hakusanatkin valittiin niin, etteivät ne sulkisi pois potentiaalisia tutkimuksia. Hakulauseke *Thought experiment** mahdollisti myös näiden sanojen esiintymisen otsikossa erikseen, jolloin potentiaalisten löydettävien tutkimusten määrä oli suurempi. Hakulausekkeella ei kuitenkaan löydetty muut kriteerit täyttäviä tutkimuksia, joiden otsikossa ei jostain syystä kumpaakaan näistä sanoista ollut. Esimerkiksi annettujen konsensusajatuskokeiden tutkimusten otsikossa voi esiintyä ajatuskokeen nimi, muttei sanoja *thought* tai *experiment*.

Luotettavuutta lisäsi se, aineistossa esiintyvät tutkimukset olivat vertaisarvioituja ja kahta tutkimusta lukuun ottamatta kaikissa oli kaksi tai useampi tutkija. Valtaosassa tutkimuksista dataa myös kerättiin usealla eri menetelmällä. Toisaalta tutkimusten toteutusvaltioissa ei ollut kovinkaan paljon vaihtelua ja tutkijatkin olivat monissa tutkimuksissa samat. Yli puolet (9/16) tutkimuksista oli toteutettu maantieteellisesti lähekkäin olevissa valtioissa, Kreikassa,

Turkissa ja Israelissa, mikä voi selittyä alueen historiallisella kulttuuritaustalla.

Tarkasteltavien tutkimusten maantieteellinen keskittyminen kuitenkin heikentää tämän katsauksen luotettavuutta. Myös tutkimusten pienet otoskoot ja vertailuryhmien puuttuminen heikentää niiden tulosten yleistettävyyttä. Pieni otosjoukko on todennäköisemmin vinoutunut ja ilman vertailuryhmää ei voida sanoa, onko ajatuskokeella todella saavutettu parempia oppimistuloksia muihin opetustapoihin verrattuna.

Viimeisimpänä luotettavuuteen vaikuttavana tekijänä voidaan pitää ajatuskokeen konsensusmääritelmän puuttumista. Ilman konsensusmääritelmää ei voida taata eri tutkimusten osallistujien kommunikaatiosta löytyneiden ajatuskokeiden olleen määriteltyjä tutkijoiden toimesta samoilla kriteereillä. Yksi tutkija tai tutkijaryhmä ei välttämättä luokittele samaa tilannetta ajatuskokeeksi kuin toinen.

5.2 Jatkotutkimusehdotukset

Ajatuskokeita luonnontieteiden opetuskontekstissa on tutkittu empiirisesti melko vähän ja ainoastaan suhteellisuusteoriaan, kvanttimekaniikkaan ja klassiseen mekaniikkaan pohjautuvia ajatuskokeita on hyödynnetty. Valtaosa tästä tutkimuksesta on myös keskittynyt muutamien tutkijoiden toimesta maantieteellisesti pienelle alueelle. Lisätutkimusta tarvittaisiinkin maantieteellisesti laajemmalta alueelta ja muihin luonnontieteisiin sekä fysiikan osa-alueisiin liittyen.

Osallistujina tutkimuksissa oli enimmäkseen lukiolaisia, yliopisto-opiskelijoita ja yliopistosta valmistuneita. Lukiolaisia oli tutkittu lähinnä annettujen ajatuskokeiden, kun taas yliopisto-opiskelijoita ja valmistuneita tutkittiin heidän itse luomiensa ajatuskokeiden pohjalta. Tarkastellut tutkimukset kuitenkin osoittivat lukiolaisten ja jopa yläkoululaisten onnistuvan ajatuskokeiden luomisessa, joten lisätutkimusta kyseisellä asetelmalla tarvitaan näihin osallistujaryhmiin. Yliopisto-opiskelijoilla ja valmistuneilla on laajempi tietämys ja syvempi ymmärrys luonnontieteistä, jolloin heille saattaa olla vaikeampaa löytää haastavia konsensusajatuskokeita. Näihin liittyviä tehtäviä voi toki vaikeuttaa, mutta potentiaalisina hieman haastavampina ajatuskokeina voisivat toimia esimerkiksi termodynamiikkaan ja tilastolliseen fysiikkaan pohjautuva Maxwellin demoni tai suhteellisuusteoriaan perustuva Einsteinin kaksosparadoksi.

Malecin (2018) mukaan on hyvin todennäköistä, että ajatuskokeiden suoritukseen käytetään useita alun perin arkisten askareiden suorittamista varten kehittyneitä kognitiivisia prosesseja,

jotka vasta myöhemmin valjastettiin kehittyneempään käyttöön. Hänen mukaansa luonnontieteellisten ajatuskokeiden käyttö voidaan tyydyttävästi selittää vain, jos ratkaisuja haetaan kognitiiviselta tieteenalalta. (Malec 2018.) Tyhjentäviä vastauksia ajatuskoeprosesseihin liittyen joudutaan todennäköisesti hakemaan psykologisista tutkimuksista.

Lähteet

Kirjallisuuskatsauksen aineistona käytetyt artikkelit on merkitty asteriskilla *.

- *Asikainen, M. A., & Hirvonen, P. E. (2014). Probing Pre- and In-service Physics Teachers' Knowledge Using the Double-Slit Thought Experiment. *Science & Education*, 23(9), 1811–1833.
- Balukovic, J., Slisko, J., & Cruz, A. C. (2017). Thought experiments in teaching free-fall weightlessness: A critical review and an exploration of Mercury's behavior in "falling elevator." *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(5), 1283–1311.
- *Bademci, S., & Sari, M. (2014). Thought experiment in solving physics problems: A study into candidate physics teachers. *Egitim Ve Bilim*, 39(175), 203–215.
- Bancong, H., Nurazmi, & Sirajuddin. (2023). High school physics teachers' perceptions and attitudes towards thought experiments in Indonesia. *Physics Education*, 58(4), 1–13.
- Bancong, H., & Song, J. (2018). Do physics textbooks present the ideas of thought experiments?: A case in Indonesia. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 7(1), 25–33.
- *Bancong, H., & Song, J. (2020a). Exploring How Students Construct Collaborative Thought Experiments During Physics Problem-Solving Activities. *Science & Education*, 29(3), 617–645.
- *Bancong, H., & Song, J. (2020b). Investigating the purposes of thought experiments: Based on the students' performance. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(3), 351–360.
- Blown, E. J., & Bryce, T. G. K. (2013). Thought-Experiments About Gravity in the History of Science and in Research into Children's Thinking. *Science & Education*, 22(3), 419–481.

- Borsboom, D., Mellenbergh, G. J., & Van Heerden, J. (2002). Functional Thought Experiments. *Synthese (Dordrecht)*, 130(3), 379–387.
- Brown, J. R. (2006). The promise and perils of thought experiments. *Interchange (Toronto, 1984)*, 37(1–2), 63–75.
- Brown, J. Robert. (2011). *The laboratory of the mind : thought experiments in the natural sciences* (2nd ed.). New York: Routledge.
- Camilleri, K. (2014). Toward a constructivist epistemology of thought experiments in science. *Synthese (Dordrecht)*, 191(8), 1697–1716.
- Clement, J. J. (2009). The Role of Imagistic Simulation in Scientific Thought Experiments. *Topics in Cognitive Science*, 1(4), 686–710.
- Cooper, R. (2005). THOUGHT EXPERIMENTS. *Metaphilosophy*, 36(3), 328–347.
- *Dua, Y. S., HarraHau, R. R., & Elizabeth, A. (2020). Probing High School Students' Understanding of Einstein's Theory of Gravity Using Thought Experiments and Analogy. *Education Quarterly Reviews*, 3(4), 587–597.
- Efron, S. E., & Ravid, R. (2019). *Writing the literature review: a practical guide*. New York; Guilford Press.
- ENTRESS, C. (2019). Why do some objects fall faster than others? *Science Scope (Washington, D.C.)*, 43(1), 10–13.
- Fink, Arlene. (2005). *Conducting research literature reviews: from the Internet to paper* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Galilei, G. (1638/2013). *Dialogues Concerning Two New Sciences*. Neeland Media LLC.
- Galili, I. (2009). Thought Experiments: Determining Their Meaning. *Science & Education*, 18(1), 1–23.

- Gilbert, J. K., & Reiner, M. (2000a). Thought experiments in science education: potential and current realization. *International Journal of Science Education*, 22(3), 265–284.
- Haggqvist, S. (2009). A Model for Thought Experiments. *Canadian Journal of Philosophy*, 39(1), 55–76.
- *Ince, E., Acar, Y., & Atakan, M. (2016). Investigation of physics thought experiments' effects on students' logical problem solving skills. ERPA INTERNATIONAL CONGRESSES ON EDUCATION 2015 (ERPA 2015), 26, 1038-. CEDEX A: E D P Sciences.
- Klassen, S. (2006). The science thought experiment: How might it be used profitably in the classroom? *Interchange (Toronto. 1984)*, 37(1–2), 77–96.
- *Köse, S. D., & Özdemir, O. F. (2014). The Nature and Role of Thought Experiments in Solving Conceptual Physics Problems. *Science & Education*, 23(4), 865–895.
- Malec, M. (2018). Considerations on Scientific Thought Experiments. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 16(4), 558–566.
- *Myhre, H. V., & Bungum, B. (2016). *From the cat's point of view": Upper secondary physics students' reflections on Schrödinger's thought experiment.*
- Islas Mondragón, D. (2017). Evaluating the Cognitive Success of Thought Experiments. *Transversal (Belo Horizonte)*, (3), 68–76.
- Moue, A. S., Masavetas, K. A., & Karayianni, H. (2006). Tracing the Development of Thought Experiments in the Philosophy of Natural Sciences. *Journal for General Philosophy of Science*, 37(1), 61–75.
- Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2014.* (2015). Helsinki: Opetushallitus.
- Picha, M. (2016). A Minimalist Framework for Thought Experiment Analysis. *Organon F*, 23(4), 503–524.

- *Reiner, M. (1998). Thought experiments and collaborative learning in physics. *International Journal of Science Education*, 20(9), 1043–1058.
- Reiner, M. (2006). The context of thought experiments in physics learning. *Interchange (Toronto, 1984)*, 37(1–2), 97–113.
- Reiner, M., & Burko, L. M. (2003). On the Limitations of Thought Experiments in Physics and the Consequences for Physics Education. *Science & Education*, 12(4), 365–385.
- *Reiner, M., & Gilbert, J. (2000b). Epistemological resources for thought experimentation in science learning. *International Journal of Science Education*, 22(5), 489–506.
- *Reiner, M., & Gilbert, J. K. (2004). The symbiotic roles of empirical experimentation and thought experimentation in the learning of physics. *International Journal of Science Education*, 26(15), 1819–1834.
- Sartori, L. (2023). Putting the ‘Experiment’ back into the ‘Thought Experiment.’ *Synthese (Dordrecht)*, 201(2), 34–.
- Tuomi, J., & Sarajarvi, A. (2009). *Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi* (6. uud. laitos.). Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi.
- *Velentzas, A., & Halkia, K. (2011). The “Heisenberg’s Microscope” as an example of using Thought Experiments in teaching physics theories to students of the upper secondary school. *Research in Science Education (Australasian Science Education Research Association)*, 41(4), 525–539.
- *Velentzas, A., & Halkia, K. (2013a). From Earth to Heaven: Using ‘Newton’s Cannon’ Thought Experiment for Teaching Satellite Physics. *Science & Education*, 22(10), 2621–2640.
- *Velentzas, A., & Halkia, K. (2013b). The Use of Thought Experiments in Teaching Physics to Upper Secondary-Level Students: Two examples from the theory of relativity. *International Journal of Science Education*, 35(18), 3026–3049.

*Velentzas, A., Halkia, K., & Skordoulis, C. (2007). Thought experiments in the theory of relativity and in quantum mechanics: Their presence in textbooks and in popular science books. *Science & Education*, 16(3–5), 353–370.

*Özdemir, O. F. (2009). Avoidance from Thought Experiments: Fear of misconception. *International Journal of Science Education*, 31(8), 1049–1068.

Liitteet

Liite 1. Einsteinin hissi (yksinkertaistettu)

Kuvitellaan tyhjä ja kaukainen avaruus, jonne asti muiden taivaankappaleiden painovoimavaikutus ei välity. Kuvitellaan tähän avaruuteen hissi, jonka sisällä on henkilö esine kädessään. Hän ei tunne painovoimaa, koska hissi ei ole painovoimakentässä.

Yhtäkkiä hissi alkaa kiihdyttää tasaisesti ”ylöspäin”. Hissin sisällä oleva henkilö tuntee kiihdytyksestä aiheutuvan paineen jaloissaan, joka tuntuu täsmälleen samalta kuin seisominen maan pinnalla. Jos henkilö irrottaa kädessään olevasta esineestä, se putoaa hänen näkökulmastaan kiihtyvällä nopeudella lattialle aivan kuin esineet maan pinnalla. Näiden havaintojen perusteella hississä oleva henkilö päättelee olevansa gravitaatiokentässä.

Edeltävän tarkastelun perusteella tasaisesti kiihtyvä liike tyhjässä avaruudessa tai homogeeninen gravitaatiokenttä ovat fysiikan näkökulmasta ekvivalentit.

Einstein, A. (n.d.). *Relativity: The Special & the General Theory A Popular Exposition*, 3rd ed. Project Gutenberg. (s. 62–66)

Liite 2. Einsteinin juna (yksinkertaistettu)

Kuvitellaan tasaisella nopeudella kulkeva erittäin pitkä juna. Junan perimmäisessä vaunussa on ukkosenjohdatin A ja veturissa ukkosenjohdatin B. Havainnoijana toimiva henkilö istuu junan keskimmaisessä vaunussa täsmälleen yhtä kaukana kummastakin ukkosenjohdattimesta.

Kun salama iskee kumpaankin ukkosenjohdattimeen A ja B samanaikaisesti junan ollessa paikallaan, havainnoija havaitsee kummankin salamaniskun samanaikaisesti.

Nyt juna on liikkeessä ja jälleen salama iskee kumpaankin ukkosenjohdattimeen A ja B samanaikaisesti. Tällä kertaa havainnoija on liikkeessä veturissa olevaa ukkosenjohdatinta B kohti. Havainnoija liikkuu pois päin johdattimeen A iskevästä salamasta, jolloin tästä salamasta lähtenyt valo joutuu kulkemaan pidemmän matkan havainnoijan luokse kuin johdattimeen B iskenyt salama, jota kohti havainnoija kulkee. Koska valonnopeus on vakio ja äärellinen, havaitsee havainnoija ukkosenjohdattimeen B iskeneen salaman ensin.

Tilanteet, jotka ovat samanaikaisia yhdessä havainnointikoordinaatistossa, eivät välttämättä ole samanaikaisia muissa koordinaatistoissa. Samanaikaisuus on siis suhteellista.

Einstein, A. (n.d.). *Relativity: The Special & the General Theory A Popular Exposition*, 3rd ed. Project Gutenberg. (s. 23–25)

Liite 3. Schrödingerin kissa (yksinkertaistettu)

Kuvitellaan kissa suljettuna teräslaatikkoon laitteen kanssa. Kissa ei tiedä tästä laitteesta eikä se pääse siihen käsiksi. Kuvaillaan laitetta seuraavaksi. Säteilymittariin on kiinnitetty yksi atomi radioaktiivista ainetta, jolla on tunnin aikana 50 % todennäköisyys hajota ja 50 % todennäköisyys pysyä muuttumattomana. Jos radioaktiivinen hajoaminen tapahtuu, säteilymittari vapauttaa vasaran, joka rikkoo pienen myrkkypullon, mikä johtaa kissan kuolemaan.

Teräslaatikon systeemi jätetään itsekseen yhden tunnin ajaksi. Kissa on elossa, jos atomi ei ole hajonnut. Kyseisen systeemin aaltofunktio kertoo kissan olevan sekä elävä että kuollut ennen laatikon avaamista.

Ajatuskoe havainnollistaa atomitasolla vaikuttavan epävarmuuden siirtymisen makroskooppiseksi epävarmuudeksi, joka voidaan ratkaista suoralla havainnolla. Tämä estää niin sanotun ”epämääräisen mallin” naiivin hyväksymisen todellisuuden kuvaajana.

Ajatuskoe on siis tarkoitettu osoittamaan kvanttimekaniikan erikoisia seurauksia ja herättämään keskustelua siitä, milloin kvanttimekaaninen systeemi ei ole enää tilojen superpositiossa, vaan selkeästi yhdessä määriteltävässä tilassa.

Trimmer, J. D. (1980). The Present Situation in Quantum Mechanics: A Translation of Schrödinger's "Cat Paradox" Paper. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 124(5), 323–338. (s. 328)

Liite 4. Kaksoisrakoajatuskoe (yksinkertaistettu)

Richard Feynman esitti 1960-luvulla kaksoisrakoajatuskokeen, joka menee kutakuinkin seuraavanlaisesti.

Kuvitellaan konekivääri, joka ampuu luoteja kohti väliseinää, jossa on kaksi kapeaa rakoa. Luodit voivat kimmota raon sivusta. Raollisen seinän takana on kiinteä mittausseinä, johon raoista päässeet luodit pysähtyvät. Luodit eivät interferoi keskenään, jolloin kummankin raon ollessa auki mittausseinään ilmestyyvä osumakuvio on kummastakin raosta tulleiden luotien osumien summa. Kummankin raon ollessa auki suurin osa luodeista osuu mittausseinän keskelle ja osumakohtien määrä vähenee seinän reunoille mentäessä.

Toistetaan vastaava koe veden aalloille. Kuvitellaan veden pinnalle ongenkoho, joka toimii ympyräaaltojen lähteenä. Veteen on rakennettu edellisen koejärjestelyn tapaan väliseinä, jossa on kaksi kapeaa rakoa, joista vesi pääsee läpi. Väliseinämän takana on jälleen mittausseinä, joka mittaa aallon intensiteettiä. Kun aaltorintama osuu väliseinän rakoön, lähtee raosta Huygensin periaatteen mukainen uusi ympyräaaltorintama.

Kun vain yksi rako on auki, muodostuu mittausseinälle samanlainen mittauskuvio kuin ensimmäisessäkin kokeessa. Aaltorintaman osuessa seinään, sen intensiteetti on suurimmillaan osumakohdassa ja pienenee mittausseinän reunoille mentäessä. Aivan kuin yhden raon läpi ammuttujen luotien osumatiheyskin.

Kuitenkin molempien rakojen ollessa auki mittausseinän aaltokuva ei olekaan kahden yksittäisen raon kuvioiden summa. Aaltorintamien osuessa väliseinien rakoihin kummastakin raosta lähtee uudet aaltorintamat, jotka interferoivat toistensa kanssa eli muodostavat niin sanotun summa-aallon. Tämän seurauksena mittausseinälle muodostuukin interferenssikuvio, jossa on intensiteettimaksimeja ja niiden välissä intensiteettiminimejä. Maksimikohdissa on aallonharja, kun taas minimikohdissa on aallonpohja. Suurin maksimikohta on keskellä rakojen välissä ja maksimikohdat pienenevät symmetrisesti seinän sivuille edetessä.

Vedenaalloilla havaitun ilmiön pitäisi tapahtua myös elektronien kohdalla niiden aaltoluonteen vuoksi. Vastaavanlaisessa elektronien mittakaavaan soveltuvassa koeasetelmassa molempien rakojen ollessa auki elektronisuihkun tulisi siis muodostaa vastaava interferenssikuvio, jossa suurin osa elektroneista osuu rakojen keskelle. Tämän jälkeen mittausseinän reunoja kohti mentäessä tulee kohta ilman osumia, jonka jälkeen taas uudet osumamaksimit, joissa on vähemmän osumia kuin keskellä. Jälleen mittausseinällä

reunemmaksi mentäessä tulee tyhjä kohta, jonka jälkeen uudet pienemmät maksimit ja niin edespäin. Jopa yksittäin rakoja kohti ammuttujen elektronien tulisi kvanttimekaniikan mukaan monen ammutun elektronin jälkeen muodostaa vastaavanlainen interferenssikuvio mittausseinälle.

Doyle, Bob. (2019). *My God, He Plays Dice! How Albert Einstein Invented Most Of Quantum Mechanics*. Cambridge, MA: I-Phi Press. (s. 278–286)

Liite 5. Heisenbergin mikroskooppi (yksinkertaistettu)

Jotta voidaan ymmärtää, mitä kappaleen (esimerkiksi hiukkasen) paikalla tarkoitetaan, täytyy suunnitella selkeä koe, jonka avulla kappaleen paikka voidaan mitata. Tämän ajatuksen pohjalta Werner Heisenberg esitti Gammasädemikroskooppi-ajatuskokeensa.

Kuvitellaan gammasädemikroskooppi, joka pystyy mittaamaan hiukkasen paikan mielivaltaisella tarkkuudella, kunhan gammasäteen aallonpituus on riittävän pieni. Hiukkasen paikka voidaan mitata gammasäteen aallonpituuden tarkkuudella, jolloin mittauksen epätarkkuus on verrannollinen gammasäteen aallonpituuteen (matemaattisesti $\delta q \sim \lambda$).

Mittaustapahtuman seurauksena hiukkasen liikemäärä kuitenkin kasvaa, mikä lisää hiukkasen liikemäärän epätarkkuutta gammasäteen fotonin liikemäärän epätarkkuuden verran

(matemaattisesti $\delta p \sim h/\lambda$). Manipuloimalla jälkimmäistä yhtälöä hieman ($\delta p \sim \frac{h}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda \sim \frac{h}{\delta p}$) ja molemmat yhtälöt yhdistämällä ($\delta q \sim \frac{h}{\delta p} \Leftrightarrow \delta q \delta p \sim h$) päästään tulokseen:

$$\delta q \delta p \sim h.$$

Hiukkasen paikan epätarkkuus (δq) ja liikemäärän epätarkkuus (δp) ovat siis verrannollisia Planckin vakioon (h).

Mitä tarkemmin hiukkasen paikka mitataan, sitä epätarkempi mittaustulos saadaan hiukkasen liikemäärästä ja päinvastoin, mitä tarkemmin hiukkasen liikemäärä mitataan, sitä epätarkempi mittaustulos hiukkasen paikasta saadaan. Tutkittavasta systeemistä ei voida koskaan edes periaatteessa saada kaikkea mahdollista tietoa, sillä mittaustapahtuma vaikuttaa itse systeemiin. Tämä ajatuskoe havainnollisti Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen, joka on yksi kvanttimekaniikan peruseriaatteista.

Boughn, S.; Reginatto, M. (2018). "Another look through Heisenberg's microscope",
European Journal of Physics, 39(3). (s. 4)

Liite 6. Newtonin kanuuna (yksinkertaistettu)

Kuvitellaan vuoren huipulle tykki, josta ammutaan kuula maanpinnan kanssa yhdensuuntaisesti. Ammuttuun tykinkuulaan vaikuttaa ainoastaan Maan painovoima, minkä seurauksena kuula putoaa maahan jonkin ajan päästä ampumisesta. Ilmanvastusta ei huomioida.

Mitä suuremman nopeuden tykinkuula saa, sitä pidemmälle se ehtii lentää ennen kuin putoaa maahan. Riittävän suurella nopeudella ammuttu kuula ei enää putoakaan maahan, vaan se ”putoaa jatkuvasti Maan ohi”. Tällöin kuula jää kiertämään Maata vakiokorkeudella satelliitin tavoin.

Newton, I. (1737). *A treatise of the system of the world*. By Sir Isaac Newton. Translated into English. In *Eighteenth Century Collections Online* (3rd ed.). London: printed for B. Motte and C. Bathurst, at the Middle Temple-Gate, in Fleet-Street. (s. 5–7)