

UNIVERSITY OF JOENSUU  
DEPARTMENT OF PHYSICS AND MATHEMATICS

DISSERTATIONS 51

**Opettajien ja opettajaopiskelijoiden  
kvantti-ilmiöitä ja -olioita kuvaavat mallit:  
tapaustutkimus**

*Mervi Asikainen*

ACADEMIC DISSERTATION

To be presented, with permission of the Faculty of Science of the University of Joensuu, to public criticism in Auditorium M1 of the University, Yliopistonkatu 7, Joensuu, on December 18<sup>th</sup>, 2006, at 12 noon.

JOENSUU 2006

Julkaisija Publisher	Joensuun yliopisto University of Joensuu
Toimittaja Editor	Timo Jääskeläinen, professor
Ohjaajat Supervisors	Pekka E. Hirvonen, lecturer University of Joensuu Joensuu, Finland  Ismo T. Koponen, dosent University of Helsinki Helsinki, Finland
Esitarkastajat Reviewers	Jukka Maalampi, professor University of Jyväskylä Jyväskylä, Finland  Kaarina Merenluoto, dosent University of Turku Turku, Finland
Vastaväittäjä Opponent	Jari Lavonen, professor University of Helsinki Helsinki, Finland
Vaihto	Joensuun yliopiston kirjasto, vaihdot PL 107, 80101 Joensuu Puh. 013-251 2677, telefax +358 13 251 2691 Sähköposti: vaihdot@joensuu.fi
Exchange	Joensuu University Library, exchange P.O.Box 107, FI-80101 Joensuu Telefax +358 13 251 2691 Email: vaihdot@joensuu.fi
Myynti	Joensuun yliopiston kirjasto, julkaisujen myynti PL 107, 80101 Joensuu Puh. 013-251 2652, telefax +358 13 251 2691 Sähköposti: joepub@joensuu.fi
Exchange	Joensuu University Library, sale of publications P.O.Box 107, FI-80101 Joensuu Telefax +358 13 251 2691 Email: joepub@joensuu.fi
	ISSN 1458-5332 ISBN 952-458-891-9 ISBN (verkkojulkaisu) 978-952-458-901-7

Joensuun yliopistopaino 2006

Mervi Asikainen\*; **Opettajien ja opettajaopiskelijoiden kvantti-ilmioita ja -olioita kuvaavat mallit: tapaustutkimus** - Joensuun yliopisto, fysiikan ja matematiikan laitos, Dissertations 51, 2006. - 263 s.

ISBN 952-458-891-9

Hakusanat: fysiikan opettajankoulutus, fysiikan opetus, kvanttifysiikan opetus, oppijan mallit

\*Osoite: Fysiikan ja matematiikan laitos, Joensuun yliopisto, PL 111, 80101 Joensuu

## Tiivistelmä

Tutkimuksen avulla selvitettiin, mitä malleja opettajat ja opettajaopiskelijat käyttävät selittäessään kvantti-ilmioita ja -olioita Joensuun fysiikan ja matematiikan laitoksen fysiikan opettajalinjan syventäviin opintoihin kuuluvan *Modernia fysiikkaa opettajille* -kurssin aikana. Käsiteltyjä kvantti-ilmioita ovat *mustan kappaleen säteily* sekä *valosähköinen ja Comptonin ilmiö*; kvanttiolioista tarkastellaan *elektronia* ja *fotonia*. Lisäksi tutkittiin, miten osallistujat kokevat kurssin ja käytetyn tavanomaisista yliopistofysiikan opetusmenetelmistä poikkeavan, osallistujien ennakkotietoa hyödyntäville tehtäville rakentuvan opetuksen lähestymistavan.

Modernia fysiikka opettajille -kurssi toteutettiin tutkimuksen aikana kahdesti. Ensimmäiselle kurssille osallistuneista kahdeksasta opiskelijasta seitsemän opiskeli fysiikkaa ja yksi matematiikkaa pääaineenaan. Kurssi toteutettiin kontaktiopetuksena, jossa luentoja ja harjoituksia oli kuusi viikkotuntia yhdeksän viikon ajan. Toisen kurssin osallistujat olivat fysiikan pätevöittämisskoulutuksessa opiskelevia työssä olevia aineenopettajia. Opetus järjestettiin monimuoto-opetuksena, joka koostui kuukausittaisesta neljän tunnin lähiopetuksesta sekä etäopiskelusta. Kaikkineen kurssi kesti yhdeksän kuukautta. Tutkija toimi molempien kurssien opettajana.

Tutkimustehtävän vastaukset muodostettiin tapaustutkimuksen tutkimustraditiota hyödyntävästi. Olihan tutkimuksen tavoitteena aineenopettajien ja opettajaopiskelijoiden kvanttifysiikan oppimisprosessien syvälinen ymmärtäminen. Tutkimuksessa raportoidaan kahden tapausopiskelijan ja kahden tapausopettajan oppimisprosessit. Näitä lähtökohdiltaan erilaisia tapausoppijoita haastateltiin 4-5 kertaa kurssin aikana, minkä lisäksi he osallistuivat esi- ja lopputesteihin. Aineiston analysointia varten audio- ja videonauhoitetut haastattelut digitoitiin ja litteroitiin. Oppijoiden esille tuomien käsitysten ja mallien analysointi suoritettiin fysiikan näkökulmasta käsin.

Muodostetut tulokset osoittavat, että tutkimuksen kohteena olleet henkilöt eivät käyttäneet jäsentyneesti ja johdonmukaisesti tieteellisiä malleja. Usein oppijoiden

kvantti-ilmiöiden ja -olioiden kuvaamiseen käyttämät mallit muodostuivat useiden erillisten mallien ominaisuuksista: mallit olivat niin sanottuja hybridimalleja. Erityisesti ongelmana vaikutti olevan klassisten ja kvanttimallien sekoittuminen, joten oppijoiden esittämien mallien voidaan sanoa olevan eriytymättömiä. Mallin soveltamisen vaikeudet saattoivat johtua mallin ja todellisuuden välisen suhteen ymmärtämisen ongelmista, ja myös mallista kohteeseen siirtyvien ominaisuuksien hahmottaminen osoittautui erääksi kvanttifysiikan oppimisen ongelmakohdaksi. Lisäksi oppijan aiemman klassisen ja kvanttifysiikan tiedon epäkoherenssi vaikeutti uuden tiedon omaksumista. Toimimattomista malleista tai periaatteista luopuminen näyttää olevan oppijalle vaativa prosessi, joka vaatii oppijalta omien mallien metatason tarkastelua.

Aineenopettajien ja opettajaopiskelijoiden suhtautuminen kurssiin ja sen menetelmiin oli pääosin myönteistä. Opettajilta tehtävien varaan rakentuva opetus sai sekä kiitosta että moitetta: opetusmenetelmän koettiin positiivisessa mielessä pakottavan perehtymään opiskeltaviin aiheisiin, mutta se koettiin myös työlääksi. Sekä opettajat että opiskelijat korostivat omakohtaisen pohtimisen tärkeyttä kurssin aiheiden oppimisessa. Opettajaopiskelijat arvostivat myös opetuksen vaihtelevuutta.

Tulokset osoittavat, että fysiikan opettajaopinnoissa ja täydennyskoulutuksessa on todellinen kvanttifysiikan erikoiskurssin tarve. Tutkimukseen osallistuneiden opettajaopiskelijoiden ja aineenopettajien kvantti-ilmiöiden ja -käsitteiden hallinta oli vaatimatonta tasoa aiempien, perinteisten kvanttifysiikan kurssien jälkeen, mutta se parani selvästi kurssilla. Tutkimuksen tulokset myös muistuttavat oppijoiden ennakkotiedon huomioimisen tärkeydestä opetuksessa. Fysiikan opintojensa loppuvaiheessa olevilla opiskelijoilla kuten myös kokeneilla opettajilla voi esiintyä tieteellisen näkemyksen vastaisia käsityksiä. Myös heidän aiempi sisältöä koskeva tietonsa voi olla puutteellista. Tutkimuksen mukaan myös vaikeana pidetyn kvanttifysiikan opetuksessa on mahdollista päästä hyviin oppimistuloksiin lähtemällä liikkeelle oppijoiden ennakkotiedoista, tukemalla oppijoiden metakognitiivisten taitojen kehittymistä ja huomioimalla fysiikan malliluonne. Mainittuja tekijöitä voidaan pitää myös yleisinä laadukkaan fysiikan opetuksen kulmakivinä.

Mervi Asikainen\*; **In- and pre-service physics teachers's descriptive models for quantum entities and objects: A case study** - University of Joensuu, Department of Physics and Mathematics, Dissertations 51, 2006. - 263 p.

ISBN 952-458-891-9

Key words: physics teacher education, teaching of physics, teaching of quantum physics, student's models

\*Address: Department of physics and mathematics, University of Joensuu, P.O. Box 111, FI-80101 Joensuu

## Abstract

The study focused on in- and pre-service teachers' descriptive models of quantum phenomena and entities, and it was implemented during a course called *Modern physics for teachers* in the Department of Physics and Mathematics at the University of Joensuu. The examined quantum phenomena are *black body radiation*, *photoelectric effect* and *Compton effect*, and the quantum entities are the *electron* and the *photon*. The participants' attitudes to the course and the used educational approach were also studied. In this approach, teaching is based on exercises that emphasise students' pre-knowledge.

The course in modern physics was implemented twice during the study. The participants of the first course were physics and mathematics majors in the subject teacher programme. The course consisted of lectures and tutorials, 54 hours altogether. The total duration of the course was nine weeks. The participants of the second course were qualified subject teachers who studied in an in-service training programme for mathematics and chemistry teachers. The course was implemented as a hybrid education that consisted of contact teaching and distance learning activities. The amount of contact teaching was 36 hours in total, and the course lasted for nine months. The researcher acted as the teacher of the courses.

A case study strategy was used because the aim of the study was a profound understanding of the learning processes of in- and pre-service teachers in quantum physics. This research report presents the learning processes of two pre-service and two in-service teachers. These cases with diverse backgrounds were interviewed four to five times during the courses. In addition, they participated in pre- and post-tests. The interviews were audio- and videotaped and then digitised and transcribed for the analysis. The case learners' conceptions and descriptive models were analysed from the point of view of physics.

The results indicate that both pre- and in-service teachers had difficulties in the systematic, consistent use of scientific models. The learners' descriptive models for the quantum phenomena and entities consisted of properties of several, distinct models, thus their models can be called *hybrid models*. In particular, the participants had problems in differentiating between the classical models and the quantum models.

The results also indicate that the participants had difficulties in understanding the relationship between the model and the reality. This impeded them from applying their models in an appropriate manner. In addition, the realisation of the properties that transfer from the model to the target proved one of the essential difficulties in learning quantum physics. Incoherence in the learner's existing classical and quantum knowledge also impeded his/her learning processes. It seems clear that the demanding process of abandoning unworkable models or principles requires the learner to examine his/her models on a meta-level.

The in- and pre-service teachers' attitudes to the course and its methods were mainly positive. According to the in-service teachers, the exercise-based teaching method compels them to become acquainted with the discussed topics, although they found the process laborious. Both the pre- and in-service teachers emphasised the meaning of personal reasoning in learning the topics of the course. The pre-service teachers also respected the variability of the teaching methods.

The study shows that there is a real need for the special course of quantum physics in the physics teacher studies and in-service training. The participants' mastery of quantum phenomena and concepts was modest after earlier, traditional quantum physics courses but improved noticeably during the course. In addition, the results suggest that it is important to take students' pre-knowledge into account in teaching. Students who are in the final stage of their studies as well as experienced teachers can hold unscientific conceptions of physics, and their prior content knowledge can be insufficient. According to the study, it is possible to reach good learning results even in the challenging case of quantum physics if the teaching is based on learners' pre-knowledge and it assists them to develop their metacognitive skills. It is also important to notice the model-oriented nature of physics. The mentioned factors can also be considered general cornerstones of good physics teaching.

## Kiitän

Työn ohjaajaa dosentti Ismo T. Koposta tuesta ja kannustuksesta väitöskirjaprojektini aikana. Hänen syvälinen kvanttifysiikan sekä sen historian ja filosofian tuntemuksensa ovat olleet eräs tämän väitöskirjatyön tekemisen perusedellytyksistä. Hänellä oli kärsivällisyyttä vastata mieltäni askarruttaviin kysymyksiin, olivatpa ne sitten miten vähäpätöisiä tahansa. Toivon, että miellyttävä ja hedelmällinen yhteistyö välillämme ei pääty tämän väitöskirjan valmistumiseen.

Tutkimukseni esitarkastajia professori Jukka Maalampea ja dosentti Kaarina Merenluotoa rakentavasta palautteesta, joka sai minut vielä kertaalleen miettimään tekemiäni ratkaisuja perusteluineen. Professori Maalampea kiitän hänen kuluneiden vuosien aikana työtäni kohtaan osoittamasta kiinnostuksestaan sekä rohkaisevasta ja avarakatseisesta asenteestaan. Dosentti Merenluodolle erityinen kiitos hänen kasvatustieteen näkökulmasta esittämistään kommentteistaan.

Professori Erkki Pehkosta ja professori emerita Maija Ahteeta heidän hyvistä kysymyksistään ja kannustuksestaan Valtakunnallisen matematiikan, fysiikan ja kemian tutkijakoulun puolivuositaisissa seminaareissa. Yhtenä viidestä päätoimisesta tutkijakoulutettavasta toimiminen on ollut hieno mahdollisuus ja etuoikeus.

FT Niina Nurkkaa vertaistuesta tutkimusprosessin aikana ja siitä, että hän on muistuttanut tutkimuksen ulkopuolisen elämän olemassaolosta sen välillä hämärtyessä. Tutkijakoulukollegoitani KM Henry Leppäaho (esitark.) ja FM Markus Hahkiöniemeä (väit.) neljän tutkijakoulutusvuoden aikana käymistämme lukuisista mielenkiintoisista keskusteluista, joista paradigman merkityksellisyyttä tarkastelevat ovat olleet ehkäpä kaikkein antoisimpia. FM Tuula Puruskaista poikkeuksellisesta kiinnostuksesta tutkimustani kohtaan ja erityisesti käymistämme kvanttifysiikan ontologiaa käsittelevistä pohdinnoista.

Vanhempiani Irma ja Heimo Asikaista sekä sisariani kasv. yo. Päivi Asikaista ja farmas. Anne Asikaista kunnioituksesta ja luottamuksesta, jota he osoittivat työtäni sekä pitkään jatkuneita ja monivaiheisia fysiikan jatko-opintojani kohtaan. Esikoistani Veikkaa kiitän kärsivällisestä suhtautumisesta ”kirjankirjoitukseen”, johon hajamielisyyden ja poissaolevuuden lisäksi sisältyi pitkiksi venyneitä työpäiviä, joskus myös viikonloppuisin.

Ja viimeisenä mutta ei vähäisimpänä kiitoksin muistan ystävääni, kollegaani ja puolisoani FT Pekka E. Hirvosta: hänen vaativana ja monijakoisena roolinaan oli myös toimia työni ohjaajana. Lukemattomat ovat olleet ne fysiikkaan, fysiikan opetukseen ja oppimiseen, tieteen filosofiaan ja tutkimuksen metodiikkaan liittyneet keskustelut, joita olemme näinä vuosina käyneet, ja joiden merkitys on ollut huomattava oman opettajuuteni kasvun polulla.

Joensuussa 28.11.2006

Mervi Asikainen



# SISÄLTÖ

1. Johdanto .....	1
1.1 Tutkimuksen lähtökohtia .....	1
1.2 Tutkimustehtävästä ja tutkimuksen paradigmasta .....	2
1.3 Tutkimusprosessista ja väitöskirjan rakenteesta .....	4
2. Tutkimuksen tausta .....	5
2.1 Tieto rakentuu havaintojen kautta .....	5
2.1.1 Havainnoista käsitteisiin .....	5
2.1.2 Käsitteet muodostavat rakenteita .....	6
2.1.3 Ontologiset kategoriat .....	8
2.2 Oppimisen tavoitteena ymmärtäminen .....	12
2.2.1 Tietäminen ja ymmärtäminen .....	13
2.2.2 Tavoitteena käsitteellinen ymmärtäminen .....	13
2.2.3 Metakäsitteellinen tietoisuus mielekkään oppimisen taustalla .....	15
2.2.4 Sosiaalinen vuorovaikutus tukee oppimista .....	17
2.2.5 Oppiminen käsitteellisenä muutoksena .....	17
2.3 Opetuksella kohti käsitysten muuttumista .....	18
2.3.1 Oppimisesta ja opetuksesta .....	18
2.3.2 Oppijoiden käsitysten luonteesta .....	19
2.3.3 Mentaalimalleista .....	22
2.3.4 Oppijan tiedon huomioiminen opetuksessa .....	23
2.3.5 Oppijalähtöisiä opetuksen lähestymistapoja .....	23
2.4 Mallit ja fysiikka .....	25
2.4.1 Mallien luokittelua .....	25
2.4.2 Mallit opetuksessa .....	26
2.5 Kvanttifysiikan oppimisen erityispiirteitä .....	28
2.5.1 Kvanttifysiikan luonne oppimisen näkökulmasta .....	29
2.5.2 Klassinen ja kvanttifysiikan ontologia .....	30
2.6 Kvanttifysiikan opetuskokeiluja .....	36
2.6.1 Kvanttifysiikkaa ilman analogioita .....	37
2.6.2 Kvanttifysiikan luonnetta korostava kurssi .....	38
2.6.3 Teknologiapainotteista kvanttimekaniikkaa .....	39
2.6.4 Fenomenologis-käsitteellinen kvanttimekaniikan kurssi .....	40
2.7 Aiempien tutkimusten kokoava tarkastelu .....	41
3. Tutkimuksen toteutus .....	44
3.1 Tutkimustehtävä ja -kysymykset .....	44
3.2 Tutkimuksen paradigma .....	46
3.3 Tutkimusstrategia .....	48
3.4 Tutkimusprosessin vaiheet .....	49

3.5 Tutkimukseen osallistujat.....	50
3.6 Aineistonkeruumenetelmät.....	51
3.6.1 Esitutkimus.....	51
3.6.2 Esitesti.....	52
3.6.3 Haastattelut.....	52
3.6.4 Lopputesti ja palautekysely.....	55
3.7 Aineiston käsittely ja analysointi.....	56
3.7.1 Esitestin ja lopputestin vastaukset.....	56
3.7.2 Haastattelut.....	56
3.7.3 Palautekyselyt.....	58
3.8 Laadullisen tutkimuksen luotettavuuden tarkastelu.....	59
3.8.1 Metodologinen ja analyyttinen luotettavuus.....	59
3.8.2 Luotettavuuden arviointi laaduntarkkailuprosessina.....	61
4. Kvanttifysiikan kurssi.....	64
4.1 Kurssin suunnittelun lähtökohdat.....	64
4.1.1 Sisällön rajaaminen.....	64
4.1.2 Opetuksen lähestymistapa.....	65
4.1.3 Opiskelumenetelmät.....	68
4.2 Kurssin toteutus.....	69
4.3 Kurssin sisältö.....	70
4.3.1 Moolisen lämpökapasiteetin lämpötilariippuvuus.....	71
4.3.2 Mustan kappaleen säteily.....	74
4.3.3 Valosähköinen ilmiö.....	78
4.3.4 Comptonin ilmiö.....	81
4.3.5 Dualismi.....	83
4.3.6 Schrödingerin aaltoyhtälö ja Bornin tulkinta.....	88
4.3.7 Kurssin opetukselliset haasteet.....	90
5. Tulokset ja tulkinta.....	91
5.1 Esitestin tulokset.....	91
5.1.1 Absorptio.....	91
5.1.2 Emissio.....	93
5.1.3 Sironta.....	94
5.1.4 Kvantittuminen.....	95
5.1.5 Hiukkanen.....	96
5.1.6 Mustan kappaleen säteily.....	98
5.1.8 Keskeisten tulosten koonti ja merkitys.....	104
5.1.9 Tapausopiskelijoiden ja –opettajien valinta.....	105
5.2 Tapausopettaja Tuomas.....	106
5.2.1 Esitesti ja ensimmäinen haastattelu.....	106
5.2.2 Toinen haastattelu.....	113
5.2.3 Kolmas haastattelu.....	120

5.2.4	Lopputesti ja neljäs haastattelu .....	122
5.2.5	Tuomaan suhtautuminen kurssiin .....	128
5.3	Tapausopiskelija Aapo .....	129
5.3.1	Esitesti ja ensimmäinen haastattelu .....	129
5.3.2	Toinen haastattelu .....	138
5.3.3	Kolmas haastattelu .....	143
5.3.4	Loppukoe ja neljäs haastattelu .....	145
5.3.5	Viides haastattelu .....	152
5.3.6	Aapon suhtautuminen kurssiin .....	155
5.4	Tapausopettaja Timo .....	158
5.4.1	Peruskäsitteet ja -ilmiöt kurssin alussa .....	158
5.4.2	Kvantti-ilmiöiden oppimisprosessi .....	159
5.4.3	Kvanttiolioiden oppimisprosessi .....	162
5.4.4	Timon suhtautuminen kurssiin .....	166
5.5	Tapausopiskelija Lauri .....	167
5.5.1	Peruskäsitteet ja -ilmiöt kurssin alussa .....	167
5.5.2	Kvantti-ilmiöiden oppimisprosessi .....	168
5.5.3	Kvantti-olioiden oppimisprosessi .....	172
5.5.4	Laurin suhtautuminen kurssiin .....	174
5.6	Kvantti-ilmiöiden oppimisprosessien koonti .....	176
5.6.1	Peruskäsitteet ja -ilmiöt kurssin alussa .....	176
5.6.2	Comptonin ilmiö .....	178
5.6.3	Valosähköinen ilmiö .....	180
5.6.4	Mustan kappaleen säteily .....	182
5.6.5	Ilmiöiden mallien muuttuminen .....	186
5.7	Kvanttiolioiden oppimisprosessien koonti .....	188
5.7.1	Elektronimallit .....	188
5.7.2	Fotonimallit .....	195
5.8	Lopputestin tulokset .....	202
5.8.1	Mustan kappaleen säteily .....	202
5.8.2	Elektronin ja fotonin kvanttiolioisuus .....	204
5.8.3	Keskeisten tulosten koonti ja merkitys .....	208
5.9	Osallistujien suhtautuminen kurssiin .....	209
5.9.1	Opiskelumenetelmät .....	209
5.9.2	Kurssin vaatavuustaso .....	212
5.9.3	Kurssin antamat valmiudet .....	214
5.9.4	Tulosten koonti .....	215
6.	Pohdinta ja arviointi .....	217
6.1	Tutkimustulosten pohdinta .....	217
6.1.1	Oppijoiden kvantti-ilmiöitä kuvaavat mallit .....	217
6.1.2	Oppijoiden kvanttiolioita kuvaavat mallit .....	219
6.1.3	Oppijoiden suhtautuminen kurssiin .....	221

6.2 Tutkimuksen laadun tarkastelu.....	222
6.2.1 Metodologinen ja analyyttinen luotettavuus .....	222
6.2.2 Luotettavuuden arviointi laaduntarkkailuprosessina.....	226
6.3 Tutkimuksen teoreettinen ja praktinen merkitys.....	226
Lähteet.....	230
Liitteet .....	244

# LUKU I

## Johdanto

### 1.1 Tutkimuksen lähtökohtia

Joensuun yliopiston fysiikan laitos tarjoaa opettajaopiskelijoille fysiikan oppimisen ja opetuksen tutkimukseen pohjautuvat fysiikan syventävät opinnot. Eräs näistä erikoiskursseista on *Modernia fysiikkaa opettajille*, jolla perehdytään kvanttifysiikan syntyyn johtaneisiin ilmiöihin ja niiden tulkintaan.

Tarve tälle uudentyylliselle kurssille nousi esille valmistuneille opettajille tehdystä kyselystä, joka koski fysiikan laitoksen kurssitarjontaa opettajan työssä toimimisen näkökulmasta (Lähde 2002). Erityisesti kritiikkiä sai osakseen kvantti- ja atomifysiikan kurssi, jolla ei koettu olevan yhtymäkohtia koulumaailman kvantti- ja atomifysiikan kanssa. Lisäksi laitoksen kurssien sisältöjä analysoitaessa oli havaittavissa, että hiukkasfysiikan perusteita ei käsitellä millään kurssilla. Näin syntyi idea opettajille suunnatusta modernin fysiikan kurssista, jossa pääpaino on kvanttifysiikan alueessa, mutta johon sisältyy myös hiukkasfysiikan perusteita.

Samoihin aikoihin käynnistettiin kvanttifysiikan oppimisen ja opettamisen tutkimusyhteistyötä Joensuun fysiikan laitoksen ja Helsingin yliopiston fysikaalisten tieteiden laitoksen välillä. Helsingissä fysiikan opettajaksi opiskelevien opetusohjelmaan on jo useiden vuosien ajan kuulunut kvanttifysiikan perusteita tarkasteleva kurssi, jonka opettajat ovat perehtyneet kvanttifysiikan lisäksi sen historiaan ja filosofiaan. Kurssin sisältöjen oppimista on myös tutkittu jonkin verran (Mannila, Koponen & Niskanen 2002; Koponen & Heikkinen 2005; Heikkinen 2005). Vastaavasti Joensuun yliopiston fysiikan laitoksen opettajankoulutuksen henkilöstön vahvuusalueeksi voidaan mainita fysiikan sisällön lisäksi opetuksen ja oppimisen tutkimuksen teoreettinen ja praktinen tuntemus. Tuolloin Joensuussa oli jo tehty kaksi eri fysiikan osa-alueiden oppimista tarkastelevaa väitöskirjatutkimusta (Viiri 1995; Saari 2000) ja kaksi oli työn alla (Hirvonen 2003; Savinainen 2004). Näiden kahden vahvuusalueen yhdistäminen oli hyvä lähtökohta tutkimusyhteistyölle ryhmiemme välillä.

Aiempiä kvanttifysiikan oppimisen ja opetuksen problematiikkaan liittyviä tutkimuksia tarkasteltaessa käy ilmi, että suurin kvanttifysiikan käsityksiä kartoittavista

tutkimuksista on tehty lukiotasolla. Herää kysymys, ovatko näiden tutkimusten tulokset yleistettävissä koskemaan yliopisto-opiskelijoiden ja erityisesti opettajaksi opiskelevien ja työssä olevien opettajien käsityksiä. Lisäksi raportoiduissa harvalukuisissa opetuskokeiluissa ei kiinnitetä huomiota oppimisprosesseihin, vaan oppimista tarkastellaan ennen opetusta ja sen jälkeen. Kokonaisuutena aiempien kvanttifysiikan oppimista tarkastelevien tutkimusten pohjalta muodostuva kuva oppimisesta jää varsin staattiseksi eikä tue nykyaikaista oppimiskäsitystä, jonka mukaan oppijoiden mallit tulisi ymmärtää dynaamisiksi ja alati muuttuviksi rakenteiksi. Vasta näiden dynaamisten muutosprosessien tutkimus tuottaa sellaista tietoa, jonka avulla opetuksen kriittiset kohdat voidaan tunnistaa ja tehokkaasti huomioida opetuksessa.

## 1.2 Tutkimustehtävästä ja tutkimuksen paradigmasta

Käsillä olevan tutkimuksen tutkimustehtävänä on fysiikan opettajaopiskelijoiden ja työssä olevien fysiikan opettajien kvantti-ilmiöiden ja -olioiden mallien selvittäminen toteutetun kurssin aikana. Kurssilla käsiteltävät kvantti-ilmiöt ovat sähkömagneettisen säteilyn ja materian välisiä vuorovaikutusilmiöitä, joita klassisen fysiikan teorioiden ja mallien avulla ei voida menestyksellisesti selittää. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan oppijoiden mustan kappaleen säteilyn, valosähköisen ilmiön ja Comptonin ilmiön malleja. Kvanttioliot ovat oliota, joita eivät luokiteta ominaisuuksiensa ja käyttäytymisensä perusteella klassisten perusolioiden, hiukkasten tai kenttien ontologisiin kategorioihin. Käsillä olevassa työssä tarkastelu kohdistuu elektronin ja fotonin käsitteiden ymmärtämiseen ja niiden asemaan kvanttifysiikan ontologiassa.

Oppijan mallilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa oppijan ilmaisemaa selitystä tarkasteltavalle ilmiölle tai oliolle. Malli voi muodostua useista tarkasteltavaan aiheeseen liittyvistä käsitteistä, jotka yhdistyvät toisiinsa muodostaen verkkomaisen rakenteen, *käsiteverkon* (Eysenck & Keane 2005). Näkemykseni mukaan oppijan käsityksistä vuorovaikutteisten tutkimusmenetelmien kautta saatava tieto ei vastaa sellaisenaan oppijan sisäisiä malleja, pikemminkin oppijan vastaukset kuvastavat niitä (ks. esimerkiksi Vuorinen, Tuulala ja Mikkonen 1995).

Helsingin fysikaalisten tieteiden laitoksella tehdyn tutkimustyön pohjalta näyttää siltä, että mallien episteemisen aseman ymmärtäminen on keskeisessä asemassa kvanttifysiikan oppimisessa (Mannila ym. 2002; Heikkinen 2002; Heikkinen 2005; Koponen & Heikkinen 2005). Kvanttifysiikassa todellisuuden, empirian, tulkintojen ja mallien välinen suhde on kompleksisempi kuin makroskooppisten olioiden klassisessa fysiikassa. Kvanttifysiikan tietorakennetta ei voida konstruoida suoraan empiiristen havaintojen pohjalta, kuten esimerkiksi useissa lukiotason klassisen fysiikan kursseissa voidaan tehdä. Sen sijaan opetuksessa pyritään rakentamaan abstraktien käsitteiden

välisiä suhteita empiiristen havaintojen tulkinnan kautta, jolloin käsitteiden klassisista merkityksistä joudutaan joskus luopumaan (Heikkinen 2002; ks. myös Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1998). Täten suorien havaintojen tekeminen on mahdollista vain ilmiöistä, ei olioista.

Tutkimustehtävään etsitään vastauksia tapaustutkimuksen tutkimustraditiota hyödyntäen, koska tutkimuksen tavoitteena on tutkimuksen kohteeksi valittujen yksittäisten opiskelijoiden ja opettajien kvanttifysiikan oppimisprosessien syvälinen ymmärtäminen. Työssä nojataan konstruktivistiseen paradigmaan, jolle on ominaista ontologian relativistisuus, epistemologian subjektivistisuus sekä metodologian hermeneuttisuus ja dialektisuus (Denzin & Lincoln 1994). Ontologian relativistisuus tarkoittaa sitä, että on olemassa useita eri todellisuuksia, jotka on ymmärrettävä sosiaaliseen vuorovaikutukseen ja kokemuseräisyyteen perustuvina abstrakteina, muuttuvina mielen konstruktioina. Täten sama todellisuus eri yksilöiden kokemana voi olla sisällöllisesti ja muodollisesti erilainen. (Guba & Lincoln 1994) Epistemologian subjektivistisuus tulkitaan siten, että tieto konstruoituu yksilöiden välisessä vuorovaikutuksessa. Tällöin yksilöiden konstruktioista voidaan saada tietoa sosiaalisen vuorovaikutuksen avulla (Guba & Lincoln 1994), mutta ne voivat olla myös yksilöiden tuottamia tekstejä (Kvale 1996). Konstruktioita pyritään ymmärtämään hermeneuttisia menetelmiä käyttäen.

Konstruktivistisen paradigman merkityksen pohdiskelu saa tutkijan nöyrytymään tutkimuskohteen kompleksisuuden äärellä. Relativistinen ontologia ei kiellä oppijan todellisuuksien olemassaoloa, vaikka ne ovatkin alati muuttuvia ja konstruoituvat vuorovaikutuksessa. Subjektivistinen epistemologia on tiedostettava tutkimuksessa saadun tiedon ja tutkimuksen tulosten arvioinnissa. Tutkimuksessa muodostetut oppijan konstruktiot kuvaavat oppijan ajattelua tietyllä hetkellä, joten konstruktiot kertovat jotakin oppijan ymmärtämisestä, mutta ei koko totuutta. Tiedon totuudesta tai totuusarvosta puhuminen oppijan ymmärtämistä koskevan tutkimuksen yhteydessä onkin merkityksetöntä, koska oppijan käsityksiin liittyvän tiedon ontologia ei ole samankaltaista kuin esimerkiksi fysikaalisen tiedon ontologia. Fysikaalisen tiedon epistemologiaa sen sijaan oivallisesti kuvaa lordi Kelvinin eli William Thomsonin toteamus vuodelta 1883: ”Vasta kun voit mitata sen mistä puhut ja ilmaista sen lukuina, tiedät mistä puhut” (Kelvin 2001).

Metodologian hermeneuttisuudessa on syytä olla varovainen. Mikäli tutkija huomaa ymmärtävänsä tutkittavia ilmiöitä tutkittavan oppijan puolesta, on vaarana ylitulkinta, jolloin tutkimustulokset muuttuvat myönteiseen suuntaan. Tässä tutkimuksessa lisähaasteen tuo tutkimuksen keskittyminen varsin vähän tutkitun kvanttifysiikan aihealueen ymmärtämiseen, jonka käsitteiden abstraktiuden taso on korkea useisiin klassisen fysiikan osa-alueisiin verrattuna.

Abstraktien käsitteiden ymmärtämisen tutkimiseksi tutkimuksessa on käytetty syväluotaavia haastatteluja kurssin eri vaiheissa. Tutkimuksen yksityiskohtainen kuvaus mahdollistaa tehtyjen johtopäätösten ja niiden perusteiden ymmärtämisen. Tutkimusprosessin kuvauksen läpinäkyvyys ja yksityiskohtaisuus auttavat myös arvioimaan tutkimuksen laatua (Kvale 1996; Stake 1995).

### 1.3 Tutkimusprosessista ja väitöskirjan rakenteesta

Käsillä olevaan väitöskirjatyöhön kulminoituvaa tutkimusprojektia voidaan luonnehtia päämäärätietoiseksi ja suunnitelmalliseksi. Ohjaajien avustuksella laadittu tutkimussuunnitelma on toiminut tutkimusprosessin punaisena lankana. Vaikka tämän tyyppiselle tutkimukselle on ominaista tutkimuksen eläminen sen eri vaiheissa, suuria muutoksia ei tutkimuksen peruslähtökohtiin ole tarvinnut tehdä. Itse tutkimusprosessi ei luonnollisesti kuitenkaan ole ollut suoraviivainen verrattuna tutkimuksen kronologiseen etenemiseen, vaan pikemminkin syklinen ja hermeneuttinen. Tutkimuksen osa-alueiden riittävän syvällinen hallinta on vaatinut jatkuvaa opiskelua, pohdintaa ja uutta opiskelua. Myös raportointivaiheelle sama syklinen työskentely on ollut leimallista.

Huolimatta siitä, että väitöskirja on rakenteeltaan melko perinteinen, sen tavoitteena on välittää lukijalle kuva tutkimuksen prosessiluonteesta. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tutkimusaineisto käsittelyprosesseineen on kuvattu yksityiskohtaisesti.

Johdannon jälkeen luvussa II rakennetaan oppimisteoreettinen perusta toteutetuille kursseille ja oppimisen tutkimukselle sekä tarkastellaan aiempia kvanttifysiikan oppimisen ja opettamisen aihepiiriin kuuluvia tutkimuksia. Luvussa III kuvataan tutkimuksen toteutus metodologisesta näkökulmasta ja luvussa IV esitellään tutkimukseen liittyvän kurssin kvanttifysiikan sisältö, joka luo taustaa luvussa V esiteltävien tutkimuksen tulosten ymmärtämiselle. Tuloksia peilataan sekä luvussa IV esitettyyn fysikaaliseen tietoon että muiden fysiikan osa-alueiden tietoon, joka on tuotu yksityiskohtaisesti esille tulosten tulkinnan yhteydessä. Tuloksista suurimman osan muodostavat tapaustutkimusopiskelijoiden oppimisprosessikuvaukset. Luku VI keskittyy tulosten pohdintaan sekä tutkimuksen laadun ja uskottavuuden arviointiin.



## LUKU II

### Tutkimuksen tausta

Tässä luvussa tarkastellaan tutkimuksen teoreettista taustaa. Yksilökonstruktivistisesti painottunutta oppimisteoreettista osiota lähestytään kognitiivisen psykologian näkökulmasta. Yleisen oppimisteorian jälkeen tarkastellaan kvanttifysiikan oppimista ja opetusta sekä siihen liittyviä aiempia tutkimuksia. Luvussa esiteltävät näkemykset vaikuttavat myös luvussa IV tarkasteltavan *Modernia fysiikkaa opettajille* -kurssin suunnittelun ja sen opetuksen taustalla.

#### 2.1 Tieto rakentuu havaintojen kautta

##### 2.1.1 Havainnoista käsitteisiin

Ihmisen tiedonkäsittely pohjautuu aistien kautta vastaanotettuun tietoon, kunnes syntyy havaintokokemus. Aistien välityksellä muodostetussa havaintokuvassa todellisuus esiintyy merkitystä vailla olevina, yksilön elämäkokemuksesta tai teoreettisesta tiedosta irrallisina objekteina. Jotta objektit saavat merkityksen, on yksilön prosessoitava havaintokuvaa käsitteellisesti eli muutettava se käsite-esitykseksi. (Saariluoma 1990)

Yksilön jakaessa tiedon asia- tai olioluokkiin opittavan, havaittavan, muistettavan ja tunnistettavan tiedon määrä vähenee (Eysenck & Keane 2005). Psykologian näkökulmasta käsite voidaankin määritellä tietoesitykseksi, jolle olioiden ja tapahtumien luokittelu perustuu. Luokittelu tekee mahdolliseksi olion tai tapahtuman liittämisen yksilön aiempiin kokemuksiin ja yksilön koko toiminnan mielekkään hallitsemisen. (Saariluoma 1990) Käsitteet ovat eräänlainen mentaalinen liima, joka pitää yksilön mentaalimaailman koossa laajempia tietorakenteita muodostaen. Yksilön joutuessa uuteen tilanteeseen luottaa hän tuntemiinsa käsitteisiin yrittäessään ymmärtää mitä tapahtuu. Täysin vieraat tilanteetkin muistuttavat yleensä jotenkin yksilön aiempia kokemuksia. Käsitteet sitovat yksilön aiemmat kokemukset sen hetkiseen vuorovaikutukseen maailman kanssa. (Eysenck & Keane 2005)

Käsitteellistetyssä todellisuudessa oliot saavat muistikuviiin pohjautuvia ominaisuuksia ja yksilö pystyy käsite-esityksen pohjalta ennustamaan oman toimintansa seurauksia. Muistissa on kullekin asialle oma representaatio, jolle esimerkiksi havainnon kohteiden tunnistaminen perustuu. Ihminen pystyy konstruoimaan myös kompleksisia ja aistihavaintojen ulottumattomissa olevia olioita, kuten yhteiskunnan tai atomin. (Saariluoma 1990) Käsitteet mahdollistavat ihmisten kommunikoinnin toistensa kanssa; käsitteiden avulla yksilöt välittävät tietoa itsestään ja maailmasta sellaisena kuin he sen näkevät ja kokevat (Eysenck & Keane 2005)

### 2.1.2 Käsitteet muodostavat rakenteita

Käsitteen merkitys yksilölle riippuu siitä, miten kyseinen käsite yhdistyy muihin käsitteisiin yksilön muistissa. Käsite saa merkityksensä osana toisiinsa liittyvien käsitteiden verkostoa, käsiteverkkoa. Lisäksi käsitteen merkitys riippuu havaintoprosesseista sekä yhteyksistä käsitteen ja ulkoisen maailman välillä. Mikäli se ei kytkeydy lainkaan muihin yksilön tuntemiin käsitteisiin, on se yksilölle merkityksetön. (Eysenck & Keane 2005)

Käsitteen merkityksen voidaan myös ajatella muodostuvan yksilön käsitteeseen liittämiin väitteiden yhdistelmänä. Täten käsitteen merkityksellisyys kasvaa hänen oppiessaan uusia käsitteen muihin käsitteisiin yhdistäviä väitteitä. Kun ulkoa oppiminen on pikkutarkkaa käsitteiden määritelmien muistamista, tarkoittaa mielekäs oppiminen käsitteen liittämistä olemassa olevaan käsitejärjestelmään pätevien väitteiden avulla. (Novak 2002)

Oppijan käsitteet, joita luonnontieteen oppimistutkimuksissa kutsutaan käsityksiksi, eivät kuitenkaan ole stabiileja vaan tilannesidonnaisia ja yksilön tavoitteista riippuvia. Oppijan käsitteitä ei voida esittää pelkkinä erillisinä käsiteloukkina, koska käsitteisiin ja käsiteloukkiin liittyy esimerkiksi kontekstuaalista tietoa. Esimerkiksi pyydettäessä koehenkilöitä kertomaan tiettyjen esineiden ominaisuuksista henkilöt kertoivat ominaisuuksien lisäksi paljon muutakin esineisiin liittyvää tietoa; koehenkilöiden esineistä ilmaisema tieto oli rikkaampaa. (Eysenck & Keane 2005)

Oppijoiden luonnontieteen, ja erityisesti fysiikan käsitysten keskinäisen rakenteen selvittäminen on ollut useiden tutkimusten kohteena (Chi, Slotta & de Leeuw 1994; Vosniadou 1994; 1997, diSessa 1993; diSessa, Gillespie & Esterly 2004; Slotta, Chi & Joram 1994). Tutkijat eivät kuitenkaan ole yksimielisiä siitä, muodostavatko oppijan käsitykset koherentin, jopa teorian kaltaisen rakenteen, vai onko käsitysten muodostama rakenne sirpalemainen. DiSessan ym. (2004) mukaan tutkimusten toisistaan poikkeavat tulokset voivat selittyä esimerkiksi tutkimusten erilaisilla toteutustavoilla. Lisäksi on

paikallaan huomauttaa, että Vosniadoun tutkimusten kohderyhmänä ovat olleet alakouluikäiset lapset diSessan tutkiessa fysiikan opintojaan aloittavia opiskelijoita.

Vosniadoun (1987; 1994) mukaan lasten intuitiiviset ajatukset fysikaalisesta maailmasta vastaavat muutamaa, ennako-oletusten tai juurtuneiden uskomusten rajoittamaa koherenttia mallia, jotka kehittyvät kokemusten kautta ja ovat pääasiassa tietoisien valvutuneisuuden saavuttamattomissa. Näitä yksilön ajattelua ja ymmärtämistä ohjaavia malleja Vosniadou kutsuu kehysteorioiksi<sup>1</sup>. Hänen mukaansa lapset muodostavat jo varhain teorian kaltaisen käsityksen maailmasta ja uskomusjärjestelmän todellisuuden luonteesta. Keskeisin todellisuuden olemusta koskeva oletus on, että maailma on sellainen kuin miltä se näyttää. Tämän oletuksen pohjana on uskomus, jonka mukaan omat havainnot antavat luotettavaa tietoa maailmasta ja sen tapahtumista. Esimerkkeinä voidaan mainita lasten uskomus avaruuden ylös/alas -suuntien mukaisesta järjestyksestä tai uskomus, jonka mukaan alhaalta tukemattomat kappaleet putoavat alaspäin.

Näiden kehysteorioiden lisäksi on olemassa nimenomaisteorioita<sup>2</sup>, jotka kiinnittyvät kehysteorioihin, ja joita kehysteoriat rajoittavat. Opetus kohdistuu yleensä juuri näihin nimenomaisteorioihin. Esimerkiksi lapsen selitys, jonka mukaan ihmiset asuvat litteän, pannukakun muotoisen Maan pinnalla on Vosniadoun mukaan osoitus maan muodon nimenomaisteoriasta, jota rajoittavat kehysteorian oletukset ”tukemattomat kappaleet putoavat alaspäin” ja ”avaruus on järjestäytynyt ylös/alas -suunnissa”. (Vosniadou 1987)

DiSessan mukaan oppijan fysikaalista maailmaa koskeva tietämys ei ole koherentti: pikemminkin se on sirpalemainen. Oppijan fysiikan ennakkotieto koostuu sadoista tai tuhansista skeemoista<sup>3</sup>, jotka eivät liity tavanomaisiin tilanteisiinsa. Näitä skeemoja kutsutaan Knowledge in Pieces -teoriassa p-primeiksi<sup>4</sup>. Yksilöt kokevat nämä primitiivit usein itsestään selvyyksiksi, jotka palautuvat mieleen tyypillisesti kokonaisina<sup>5</sup>. Täten ne ovat irrallisia selityksiä, jotka eivät vaadi perusteluja, tai joita ei edes voida selittää, koska ”asiat vain ovat niin kuin ne ovat”, ja ne luovat tunteen tyydyttävästä ymmärryksestä. Kun yhtään primitiiviä ei ole käytettävissä, tai maailman käyttäytyminen on ristiriidassa primitiivin kanssa, kokee yksilö hämmennystä.

DiSessan oppimisnäkemys perustuu tilannekohtaiselle kognitiolle. Sen perusajatuksena on, että oppija vastaa kysymykseen tilanteen hänessä herättämän primitiivisen tietämyksen mukaan, jolloin tieto rakentuu näiden primitiivien eli

---

<sup>1</sup> Engl. framework theory

<sup>2</sup> Engl. specific theories

<sup>3</sup> Tiedon ja kokemuksen varastoitumisen muoto, jonka avulla voidaan selittää yksilön aiempien tietojen tai kokemusten vaikutus uusien asioiden havaitsemisessa ja uusissa tilanteissa toimimisessa (Lehtinen ja Kuusinen 2001)

<sup>4</sup> Engl. phenomenological primitives

<sup>5</sup> Esimerkiksi ”työskentelemällä tehokkaammin saa enemmän tuloksia.”

irrationaalisten selitysten jonoista. Täten oppiminen on primitiivijonoissa tapahtuvia muutoksia, jota tapahtuu oppijan kiinnittäessä huomiota vastauksensa perusteluihin ja selityksiin. (diSessa 1993; diSessa ym. 2004)

Primitiivien muodostamassa tietorakenteessa on niitä toisiinsa yhdistäviä ominaisuuksia, tärkeämpiä ja vähemmän tärkeitä primitiivejä, ja myös puutteellisesti pääteltyjä primitiivien välisiä suhteita. Tietorakenteiden sirpalemaisuuksien johtuu diSessan mukaan siitä, että yksilön kokemukset ovat rikkaita, ja primitiivejä integroivien kokonaisvaltaisten näkemysten muodostaminen on oppijalle vaativa tehtävä. (diSessa 1993; diSessa ym. 2004)

Ontologisten kategorioiden teoriassa maailman oliot kuuluvat materiaan, prosessien ja mentaalisten tilojen pääkategorioihin. Menestyksekkään oppimisen tuloksena oliot sijaitsevat oikeissa ontologisissa kategorioissa. Opitun poiketessa tieteellisestä käsityksestä on oppija mahdollisesti luokitellut opittavan tiedon väärään kategoriaan. (Chi 1992; 2005; Chi ym. 1994; Slotta ym. 1995) Oppijoiden fysiikan käsitysten luokittelun ja ymmärtämisen ontologisten kategorioiden teoria vaikuttaa saatujen tulosten perusteella lupaavalta (Johnston & Southerland 2000; Slotta ym. 1995). Seuraavaksi teoriaa tarkastellaan hieman lähemmin.

### 2.1.3 Ontologiset kategoriat

Chin käsitteellisen muutoksen teoria nojautuu epistemologiselle, metafyyksiselle ja psykologiselle olettamukselle (Chi 1992; Chi ym. 1994). Epistemologinen oletamus koskee olemassa olevien olioiden luonnetta, metafyyksinen käsitteiden luonnetta ja psykologinen oppijan käsityksiä. Nämä oletamukset muodostavat yhdessä yhteensopimattomuushypoteesin, jonka avulla voidaan selittää tiettyjen käsitteiden oppimisen vaikeudet.

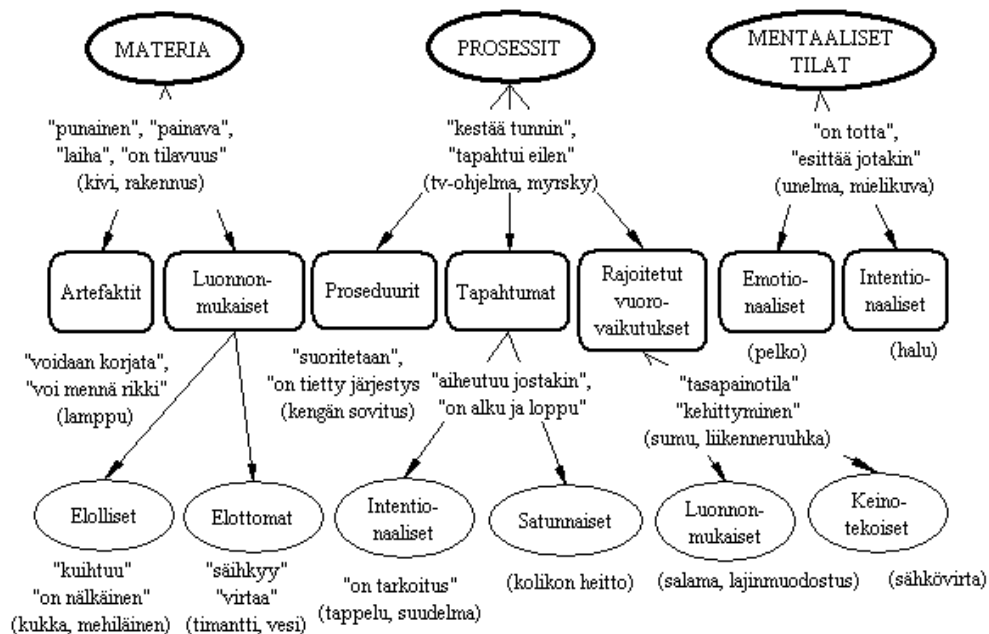
#### A. Epistemologinen oletamus

Epistemologisen oletuksen mukaan maailman oliot kuuluvat erilaisiin ontologisiin kategorioihin (kuvio 2.1, s. 9). Ontologisia pääkategorioita on kolme: *materia*, *prosessit* ja *mentaaliset tilat*, mutta on mahdollista, että niitä voi olla useampiakin. Kukin pääkategoria jakautuu hierarkkisiin alakategorioihin. Esimerkiksi prosessien kategoria jakautuu *tapahtumiin*, *proseduureihin* ja *rajoitettuihin vuorovaikutuksiin* ja materiaan kategoria *luonnonmukaisiin* ja *artefakteihin*.

Tietyn pääkategorian alakategoriat eroavat toisistaan, koska niillä ei ole yhteisiä ontologisia ominaisuuksia. Esimerkiksi kukin materiaan alakategoria on ontologisesti erilainen kuin kukin prosessien kategoria. *Ontologinen ominaisuus* on ominaisuus, joka oliolla voi olla seurauksena kuulumisesta tiettyyn ontologiseen kategoriaan.

*Määrittelevä ominaisuus* puolestaan on luonteenomainen ominaisuus, ja joka sillä täytyy olla. Esimerkiksi mehukannun ominaisuus nokka on kannun määrittelevä ominaisuus. *Tyypillinen ominaisuus* puolestaan sellainen, joka oliolla useimmiten on. Mehukannu on usein valmistettu lasista, vaikka ei välttämättä aina. Siten mehukannun eräs ontologinen ominaisuus on, että se voi mennä rikki.

Ontologiset ominaisuudet ovat laadullisesti erilaisia tyypillisiin ja määritteleviin ominaisuuksiin verrattuna. Materiakategoriaan kuuluvilla olioilla (hiekkä, maali, ihminen) on ontologisia ominaisuuksia kuten ”voidaan varastoida”, ”on tilavuus”, ”on massaa” tai ”väri”. Prosessit kuvastavat omia ominaisuuksiaan, kuten ”tapahtuu ajanjakson aikana” tai ”johtaa johonkin”. (Chi ym. 1994)



**Kuvio 2.1.** Epistemologinen olettaus yksilöiden maailman olioiden luonnetta koskevista käsityksistä. Materiaan, prosessien ja mentaalisten tilojen kategoriat ovat ontologisesti erilaiset. Ontologiset ominaisuudet on esitetty lainausmerkeissä. (mukaiillen Chi ym. 1994)

Ontologiset kategoriat eivät ole erilliset, jos on olemassa ontologiset kategoriat yhdistävä ominaisuus, tai sellainen ominaisuus, joka voidaan liittää molempien kategorioiden jäseniin. Koska sekä ihminen että eläin voivat olla esimerkiksi nälkäisiä, ne eivät muodosta erillisiä ontologisia kategorioita. Mikäli yhden kategorian ominaisuutta ei voida liittää muiden kategorioiden jäseniin, ovat kategoriat ontologisesti

erillisiä. Esimerkiksi artefaktien, kuten mehukannun, ontologista ominaisuutta ”voidaan korjata” ei voida ymmärtää luonnonmukaisten materian luokkaan kuuluvan koiran ontologiseksi ominaisuudeksi. Pääkategorioiden ontologiset ominaisuudet ovat aina toisensa poissulkevia. (Sommers 1963)

Ontologisten kategorioiden teoriassa käsitteellinen muutos tapahtuu, kun käsite on sijoitettava uudelleen toiseen ontologiseen kategoriaan. Luonnontieteen käsitteiden oppiminen vaatii usein juuri tätä käsitteiden uudelleensijoittamista. Mikäli oppijan ymmärrys käsitteen merkityksestä on heikko, sijoittaa hän käsitteen helposti väärään ontologiseen kategoriaan. (Chi ym. 1994)

Ontologisten kategorioiden teoriaa voidaan soveltaa fysiikan perusolioiden luokitteluun. Fysiikan perusoliot, hiukkaset ja kentät, voidaan ajatella erillisiksi ontologiseksi kategorioiksi, joilla on tietyt ontologiset ominaisuudet. Kvanttioliot sen sijaan eivät kuulu klassisten hiukkasten eivätkä kenttien ontologiseen kategoriaan, vaan omaan kvanttiolioiden kategoriaansa. Klassisia ja kvanttiolioita ominaisuuksineen tarkastellaan lähemmin luvussa 2.5.2 (s. 30).

## B. Metafyysinen oletamus

Useat tieteellisten käsitteiden metafyysiset<sup>6</sup> käsitykset sijoittuvat prosessien alakategoriaan *rajoitetut vuorovaikutukset*. Rajoitettuja vuorovaikutuksia määrittelevät rajoitteet ovat joko tunnettuja tai ne voidaan tuntea. Esimerkiksi sähkövirta, lämpö, valo ja voima kuuluvat tähän kategoriaan. Rajoitetuilla vuorovaikutuksilla ei ole selväpiirteistä alkua tai loppua, kun sen sijaan toisen prosessien alakategorian, *tapahtumien*, alku ja loppu voidaan ennustaa. (Chi ym. 1994)

## C. Psykologinen oletamus

Psykologinen oletamus koskee oppijoiden käsitysten ontologista asemaa. Tutkimusten mukaan monet fysiikan käsitykset luokittelevat materian kategoriaan tai niillä on materian ominaisuuksia. (Chi ym. 1994) Oppijat saattavat esimerkiksi ajatella, että voima on eräänlainen kappaleeseen välittyvä impetus, ”liikevoima”, tai se on kappaleen sisäinen ominaisuus ja että impetus on eräänlainen sisäinen ”puhti”, joka voi kulua loppuun. Tämän kaltaisia tieteellisen näkemyksen vastaisia käsityksiä ilmenee oppijoiden yrittäessä ymmärtää Newtonin lakeja havaintoihinsa perustuvien arkikokemustensa pohjalta (Halloun & Hestenes 1985). Opiskelijat myös saattavat ajatella painovoiman aiheutuvan Maasta, olevan Maan ominaisuus (Johnston & Southerland 2000).

---

<sup>6</sup> Metafyysikalla tarkoitetaan ontologiaa laajempaa filosofian osa-aluetta. Ontologiset väitteet muodostavat metafyysikan ytimen.

#### D. Yhteensopimattomuushypoteesi

Ontologisten kategorioiden teoriassa tiettyjen käsitteiden oppimisen vaikeus selitetään yhteensopimattomuushypoteesin avulla. Luonnontieteiden aiheiden abstraktisuus, matemaattinen esitystapa, tai tieteellisten ja arkikielen käsitteiden erimerkityksisyys eivät ole riittäviä syitä oppimisen ongelmien selityksiksi, vaan tärkeimpänä syynä oppimisen vaikeuksiin on oppijoiden ennakkokäsitysten sijoittumien väriin ontologisiin kategorioihin. (Chi ym. 1994)

Oppijan käsityksen ollessa ristiriitainen käsitteen todellisen ontologisen aseman kanssa, vaatii käsitteen oppiminen käsitteellisen muutoksen eli hänen on siirrettävä käsityksensä toiseen ontologiseen kategoriaan. Omaksuakseen uutta tietoa tietystä käsitteestä, oppijan tulee sijoittaa uusi tieto oikeaan kategoriaan. Hän kuitenkin liittää opetettavan aineksen myös siihen kategoriaan, missä aiempi käsitys sijaitsee. Täten oppija ei voi saavuttaa täydellistä ymmärrystä käsitteestä ennen kuin hän käy läpi käsitteellisen muutoksen, jonka tuloksena sisäistää opittavan käsitteen toiseen ontologiseen pääkategoriaan. Tilanteet, joissa oppija siirtää käsitteen toiseen ontologiseen kategoriaan ovat täten alttiita väärinkäsitysten syntymiselle. (Chi ym. 1994)

Chin ym. (1994) mukaan esimerkiksi oppijoiden sähkövirtaa koskevat tieteellisen tiedon kanssa ristiriitaiset väittämät ”sähkövirtaa voidaan varastoida paristoon” tai ”sähkövirta kuluu lampussa” johtuvat juuri siitä, että oppijat sijoittavat sähkövirtaa koskevaa tietoa materia-kategorian neste-alakategoriaan. Tällöin oppija saattaa liittää sähkövirtaan ominaisuuksia ”täyttää tietyn tilavuuden” tai ”voidaan käyttää loppuun”. Käsityksen syntymisen taustalla voivat olla opetuksessa käytetyt analogiat, kuten vesianalogia<sup>7</sup>.

Mallin ontologisten ominaisuuksien periytyminen kohteeseen voi vaikuttaa tietyn käsitteen virhekäsitysten kontekstiriippuvuuteen. (Chi ym. 1994) Tällöin oppija on virheellisesti ymmärtänyt tietyt mallin ontologiset ominaisuudet opiskeltavan käsitteen ominaisuuksiksi; kyse on myös mallin episteemisen aseman ymmärtämisen ongelmasta (Harré 1970). Esimerkiksi vesianalogiassa on sekä siirtyväksi toivottuja ontologisia ominaisuuksia (”virtaa”) että sellaisia ominaisuuksia, joiden ei toivota siirtyvän (”täyttää tilan”).

Monet luonnontieteen käsitteet liittyvät sekä materia- että prosessiolioihin, joten oppijan on vuoroteltava materia- ja prosessien kategorian välillä ymmärtääkseen niitä (Chi ym. 1994). Lisäksi rajoitettujen vuorovaikutusten kategoria on hyvin vaikea määritellä, joten se on luonnollisesti hankala myös selittää ja opettaa. Tutkiessaan useita amerikkalaisia fysiikan oppikirjoja Chi ym. (1994) havaitsivat, ettei prosessitietoa

---

<sup>7</sup> Vesianalogiassa vastuksia kuvataan patoina, jotka hidastavat veden virtaamista.

esiinny oppikirjoissa eikä käsite prosessi esiinny edes niiden liitteissä. Yksilölle luonnollinen mieltymys sijoittaa monet käsitteet materian kategoriaan voi johtua niiden tuttuudesta arkielämän tilanteista ja siitä seuraavasta materian kategorian kehittyneisyydestä prosessien kategoriaan nähden.

Kvanttioliot eivät kuulu klassisten hiukkasten tai kenttien kategorioihin (Lévy-Leblond & Balibar 1990), joten niiden menestykseäs oppiminen vaatii oppijaa luomaan täysin uuden ontologisen kategorian, kvanttiolioiden kategorian. Täysin uuden kategorian luominen on oppijalle vaativa tehtävä, joka edellyttää kehittyneitä metakognitiivisia taitoja ja metakäsitteellistä tietoisuutta. Miten erottaa ne klassisten hiukkasten ja kenttien ominaisuudet, jotka ovat aidosti kvanttiolioiden ominaisuuksia niistä, jotka eivät ole kvanttiolioiden ominaisuuksia? Kuten luvussa V esitettävistä oppimisprosessikuvauksista käy ilmi, elektronin ja fotonin sijoittaminen vain ja ainoastaan kvanttiolioiden kategoriaan ei ole ongelmattonta.

## 2.2 Oppimisen tavoitteena ymmärtäminen

Behavioristinen oppimiskäsitys kehittyi 1900-luvun alussa tiedon kokemukseräisyyttä ja aistihavaintoihin perustuva korostaneen empirismin pohjalta. Behavioristisen käsityksen mukaan oppiminen on tapahtuma, jossa yksilön tiedon määrä kasvaa uuden tiedon tallentuessa oppijan muistivarastoon, josta se on otettavissa käyttöön tarvittaessa. Behavioristit näkivät oppimisen luonnontieteelliseksi ilmiöksi, jonka tutkimuksessa voidaan soveltaa luonnontieteen, erityisesti fysiikan menetelmiä. (Rauste-von Wright ym. 2003)

Vähitellen behaviorismin rinnalle nousi rationalistinen oppimiskäsitys, jonka mukaan tiedon perustana on järki ja tietoa voidaan saavuttaa vain ymmärryksen tai älyllisen intuition kautta. Yksilön aiemmat tiedot olivat myös tärkeässä asemassa rationalistisessa ajattelussa. (Rauste-von Wright & von Wright 1996)

1950-luvulta alkaen alkoi kehittyä rationalismilta vaikutteita saanut kognitiivisen psykologian ala, joka perusajatuksena on ihmisen käyttäytymisen selittäminen kognitiivisten toimintojen, kuten havaitsemisen, ajattelun ja muistamisen avulla (ks. esimerkiksi Kalakoski, Laarni, Paavilainen, Kallio, Oksala & Penttilä 2002). Kognitiivisen oppimiskäsityksen mukaan oppiminen on monisyinen prosessi, jossa yksilön kognitiiviset toiminnot nivoutuvat toisiinsa saumattomasti. Yksilölle luontainen ja jatkuva tiedonkäsittely voi aiheuttaa muutoksia hänen tiedoissaan, käsityksissään tai tunteissaan. Muutoksen ollessa suhteellisen pysyvä voidaan puhua oppimisesta. (Rauste-von Wright & von Wright 1996)



## 2.2.1 Tietäminen ja ymmärtäminen

Tietäminen voidaan määritellä yksittäisten väitteiden hallitsemiseksi (Leinonen 2002), ja se on seurausta ulkoa oppimisesta (Novak 2002). Tietäminen on täten mahdollista ilman ymmärtämistä, mutta ymmärtäminen edellyttää tietämistä. Tiedon ymmärtäminen voidaan nähdä yksilön kykyä käyttää tietoaan, ja sen edellytyksenä on tiedon liittyminen yksilön mentaaliin tietorakenteisiin. (Gerace 1992) Ymmärtäminen on jäsentynyttä tietämistä ja voidaan käsittää ”tilaksi, jossa yksilö näkee tapahtumat osana laajempaa kontekstia tai käsitteellistä viitekehystä”. Se voidaan nähdä myös prosessina, jonka avulla yksilö pyrkii rakentamaan jäsentynyttä maailmankuvaa. (Leinonen 2003)

Ymmärtäminen voidaan myös määritellä kyvyksi perustella tietyn käsitteen käyttötapa ja kyvyksi käyttää sitä järkevästi uusissa tilanteissa. Ymmärtäminen tapahtuu aina laajemmassa kontekstissa, joten yrittäessämme käsittää miten toinen henkilö tulkitsee tietyn asian, on meidän tunnettava myös se konteksti ja käsitysjärjestelmä, jonka puitteissa tämä tekee tulkintansa. (Rauste-von Wright, von Wright & Soini 2003)

## 2.2.2 Tavoitteena käsitteellinen ymmärtäminen

Oppijan muistitieto voidaan luokitella neljään eri luokkaan. Deklaratiivinen eli väitetieto koostuu yksilön tuntemista faktoista, ja se voidaan usein esittää tosina tai epätosina väitteinä. Deklaratiivinen tieto muodostaa miellelyhtymiin perustuvia verkostoja, joissa käsitteisiin liittyy faktoja. Proseduraalinen eli menetelmällinen tieto muodostuu yksilön taidoista ja tavoista. Proseduurien ei ajatella muodostavan verkostoja, vaan niiden ajatellaan liittyvän ympäristön vihjeisiin. Episodimainen eli tapahtumatieto esittää sitä, missä yksilö oli, kun jotain tapahtui ja milloin se tapahtui. Episodimaisen muistin tärkeä piirre on, että sen avulla yksilö pystyy muistamaan mistä hänen tietonsa on peräisin. (Byrnes 2001)

Neljäs tiedon laji käsitteellinen tieto puolestaan kuvastaa deklaratiiivisen ja proseduraalisen tiedon ymmärtämistä. Jos henkilö pystyy selittämään, miksi tietyt deklaratiiiviset tiedot ovat totta tai miksi proseduurit toimivat niin kuin ne tekevät, voidaan hänellä sanoa olevan käsitteellistä tietoa. Luonnollisesti on eri asia vain tuntea faktoja tai eri tilanteisiin sopivia proseduureja kuin pystyä myös perustelemaan niiden pätevyys. (Byrnes 2001)

Oppimisen ymmärtämiseksi on tutkittu eri alojen eksperttejä ja noviiseja. Tavoitteena on ollut selvittää, miltä taitavan oppimisen tulokset näyttävät. Ekspertti eli asiantuntija on henkilö, joka on kehittänyt asiantuntijuuden tietyllä alueella ja pystyy ratkomaan tehokkaasti alueen ongelmia. Ekspertin aiemmat tiedot suuntaavat hänen havaintojaan ja vaikuttavat tiedon organisoimiseen, esittämiseen ja tulkintaan. Tämä edelleen vaikuttaa ekspertin kykyyn muistaa, päätellä ja ratkoa ongelmia. (Bransford,

Brown & Cocking 1999) Voidaanko pitkän työkokemuksen omaavaa henkilöä sitten automaattisesti kutsua ekspertiksi? Ei välttämättä, sillä on olemassa ihmisiä, jotka toimivat ammateissaan rutiininomaisesti, eivätkä pyri kehittämään työssä toimimistaan. Aito ekspertti sen sijaan toimii oman suorituskäytöksensä ääri rajoilla oppien jatkuvasti uutta, alati asiantuntemustaan kasvattaen. Asiantuntijuus voidaan siten ymmärtää prosessiksi. (Tynjälä 1999)

Eksperttien ja noviisien oppimisen tutkimuksissa on käynyt ilmi, että noviisien tieto on sirpaleista ja koostuu erillisistä tiedonelementeistä (Angel, Ryder & Scott 2005). Eksperttien tieto sen sijaan on järjestäytynyt siten, että toisiinsa liittyvien elementit muodostavat ryppäitä, joita taustalla olevat käsitteet ja periaatteet hallitsevat (Chi, Feltovich & Glaser 1981; Rauste-Von Wright & Von Wright 1996). Tätä toisiinsa liittyvien tietorakenteiden muodostamaa laajempaa rakennetta voidaan kutsua käsitteelliseksi tietorakenteeksi (Beatty ja Gerace 2002).

Myös eksperttien ja noviisien ongelmanratkaisumenetelmät poikkeavat toisistaan. (Bransford ym. 1999) Fysiikan eksperttien ja lahjakkaiden college-opiskelijoiden ongelmanratkaisumenetelmien tutkimuksen tulosten mukaan ekspertit tunsivat ne pääperiaatteet ja lait, jotka pätevät tarkasteltavan ongelman ratkaisemisessa. Ekspertit pystyivät myös perustelemaan, miksi kyseiset periaatteet ja lait soveltuvat ongelman ratkaisemiseen ja miten niitä sovelletaan. College-opiskelijat sen sijaan kertoivat mitä yhtälöitä he käyttäisivät ongelman ratkaisemiseen ja miten niitä pitää manipuloida ja viittasivat fysiikan pääperiaatteisiin ja lakeihin vain harvoin. (Chi ym. 1981) Tutkimusten mukaan eksperttien ongelmanratkaisulle on ominaista, että he eivät tee suoria kaavaan sijoituksia, vaan usein piirtävät yksinkertaisen kvalitatiivisen diagrammin ajattelun tueksi, johon he palaavat ongelmanratkaisun edetessä. (Bransford ym. 1999)

Eksperttien ajattelu näyttää olevan organisoitunut suurten fysiikan periaatteiden ja ydinkäsitteiden ympärille, kun taas noviisit näkevät fysiikan ongelmanratkaisun ulkoa oppimisena, mieleen palauttamisena ja yhtälöiden manipuloimisena vastauksen saamiseksi (Bransford ym. 1999; Redish & Steinberg 1999; Redish, Saul & Steinberg 1998). Eksperttien päättelytaidot eivät kuitenkaan välttämättä ole noviisien päättelytaitoja paremmat, vaan tietorakenteiden koherenttiuden vuoksi ekspertit pystyvät soveltamaan tietojaan nopeasti ja vaivattomasti (Wittmann, Steinberg & Redish 2002). Fysiikan eksperttien ja noviisien tietorakenteita ja ongelmanratkaisutapoja on vertailtu taulukossa 2.1 (s. 15).

Eksperttien tiedon organisoituminen keskeisten ajatusten tai käsitteiden ympärille viittaa siihen, että myös opetus pitäisi suunnitella siten, että se johtaa käsitteelliseen ymmärrykseen. Perinteiset opetuksen lähestymistavat tekevät tiedon mielekkään organisoimisen vaikeaksi opiskelijoille, koska opetuksessa usein käsitellään vain pinnallisesti faktoja ennen seuraavaan aiheeseen siirtymistä. Tällöin opiskelijalla on

vain vähän aikaa kehittää ymmärtämisen vuoksi tärkeitä, tietoa organisoivia ajatuksia. (Bransford ym. 1999)

Ymmärtämisen painottamisen faktojen ja yksittäisten taitojen omaksumisen sijasta on todettu edesauttavan mielekästä tiedon konstruointia (Rauste-von Wright ym. 2003; Rauste-von Wright & von Wright 1996). Faktat ja taidot ovat merkityksellisiä vain sen laajemman tietorakenteen osana, johon ne kuuluvat. Tehokas fysiikan opetuksen lähestymistapa vaatii opiskelijoita käymään läpi tietyn päättelyketjun, joka on oleellista tärkeiden käsitteiden kehittymiselle ja niiden soveltamiselle (Vokos, Shaffer, Ambrose & McDermott 2000). Mikäli opetuksen tavoitteena on omaksua suuri määrä tietoa, oppijan tiedon järjestely voi vaikeutua, jollei syvälliseen oppimiseen ole aikaa. Eksperttien ongelmanratkaisumallien esittäminen voi olla opiskelijoille hyödyllistä, mutta mallien kompleksisuus on räätälöitävä oppijoiden sen hetkisten tietojen ja taitojen mukaiseksi. Olisi virhe esittää noviiseille eksperttien malleja ja olettaa, että he oppivat näin tehokkaasti, koska noviisien entinen tieto vaikuttaa siihen, mitä he oppivat. Tehokas opetus alkaa oppijoiden sen hetkisistä tiedoista ja taidoista. (Bransford ym. 1999)

**Taulukko 2.1.** Eksperttien ja noviisin tietorakenteet ja ongelmanratkaisutavat (mukaiillen Angel ym. 2002; Bransford ym. 1999; ks. myös Chi, Glaser & Rees 1982).

	Tieto	Ongelmanratkaisutapa
Noviisi	Erillisiä tiedonelementtejä eri konteksteissa	Yhtälöiden manipulointi ja suoraviivainen ratkaisu
Ekspertti	Linkkejä eri kontekstien tietojen välillä	Pääperiaatteisiin ja lakeihin nojaaminen, ratkaisun apuna kvalitatiivinen diagrammi

### 2.2.3 Metakäsitteellinen tietoisuus mielekkään oppimisen taustalla

Tavoitteellisen oppimisen perusedellytyksenä on oppijan pyrkimys tiedostaa kulloinkin opittavan asian ymmärryksensä ja siinä olevat puutteet, mikä edesauttaa häntä relevanttien kysymysten asettamisessa ja järkevässä tiedon haussa. (Rauste-von Wright ym. 2003) Tätä tietoisuutta omista käsityksistä, ajattelusta ja toimintatavoista, niiden kriittisestä arvioinnista ja uudistamisesta kutsutaan *metakäsitteelliseksi tietoisuudeksi* ja mainittuja taitoja *metakognitiivisiksi taidoiksi* (Tynjälä 1999; Bransford ym. 1999). Lyhyesti metakognitio voidaan määritellä oppijan tietoisuudeksi oppimisprosessistaan,

ja sen perustavanlaatuinen ajatus on, että yksilö ajattelee oma ajatteluaan (Lehtinen & Kuusinen 2001).

Jotta oppija pyrkii muuttamaan käsityksiään, on hänen koettava se tarpeelliseksi. Radikaalin muutoksen ehtona on, että oppija kokee pienet muutokset riittämättömiksi. Muutos edellyttää sellaisten ratkaisemattomien ongelmien tai poikkeuksellisten tilanteiden kohtaamista, joissa yksilön aiempi käsitys osoittautuu toimimattomaksi. (Posner, Strike, Hewson & Gertzog 1982)

Lisäksi oppijan on ymmärrettävä uuden käsitteen merkitys ja koettava se vakuuttavaksi. Hänen on käsitettävä, miten uusi käsite auttaa hänen kokemusmaailmansa jäsentämisessä, jotta hän voi tutkia käsitteen antamia mahdollisuuksia. Oppijan on myös pystyttävä ratkaisemaan aiemman käsityksen kohtaamat ongelmat uuden käsitteen avulla. Oppija kokee uuden käsitteen vakuuttavaksi myös sen ollessa koherentti hänen aiemman tietonsa kanssa. (Posner ym. 1982)

Käsitysten muuttamisen tarpeen havaitsemiseksi oppija tulee tehdä opetuksen kautta tietoiseksi aiemmista käsityksistään ja niiden toimimattomuudesta. Ilman tietoista käsitysten ja ajattelun reflektiota oppija pahimmillaan liittyy uutta tietoa olemassa oleviin tietorakenteisiinsa muuttamatta aiempia käsityksiään, jolloin tietorakenteet pahimmillaan muodostuvat sirpalemaisiksi koherenttien ja toimivien rakenteiden asemasta. (Tynjälä 1999) Opettajan tulisi tukea oppijan oppimisprosessia ja ohjata järjestelemään olemassa olevaa tietoa siten, että uusi tieto liittyy hänen tietorakenteisiinsa oikein. Muutoin oppimisen tulos ei todennäköisesti ole se mitä opettaja on tarkoittanut. (McDermott 1990)

Metakäsitteellisen tietoisuuden herättämiseksi voidaan esimerkiksi aiheuttaa kognitiivinen konflikti oppijan mielessä eli ristiriitauttaa oppijan aiempi tieto opiskeltavan asian kanssa. Esimerkiksi ryhmäkeskustelut ja kirjoittamistehtävät voivat aiheuttaa kognitiivisen konfliktin, koska ne tuovat oppijan ajattelua näkyväksi. (Tynjälä 1999) Limonin (2001) mukaan kognitiivisen konfliktin toimivuuden edellytyksenä on sen mielekkyys oppijalle. Mielekkään kognitiivisen konfliktin taustatekijöitä ovat erinäiset oppijaan, opettajaan ja oppimisympäristöön liittyvät tekijät, kuten oppijan ennakkotieto, päättelytaidot, oppijoiden ja opettajan välinen vuorovaikutus sekä opettajan aineenhallinta ja hänen käyttämänsä opetusstrategiat (Limon 2001). Kognitiivinen ristiriita voi olla joissakin oppimistilanteissa toimiva menetelmä, mutta se ei aina johda oppimiseen (Merenluoto ja Lehtinen 2004). Merenluodon ja Lehtisen mukaan mainitun kaltainen tilanne on sitä todennäköisempää, mitä kaempana oppijan aiempi tieto ja opiskeltava asia ovat toisistaan.

Vaihtoehtoisena kognitiivisen konfliktin menetelmälle voidaan opetus rakentaa niille oppijan käsityksille, jotka voivat toimia tieteellisen käsityksen lähtökohtina (Scott, Asoko & Driver 1991). Tunnetuin fysiikan opetuksessa käytetty menetelmä lienee

Brownin ja Clementin (1989) kehittämä *silta-analogiamenetelmä* ja sen modifioidut versiot (ks. esimerkiksi Clement 1993; Clement, Brown & Zeistman 1989; Clark & Jorde 2004; Savinainen, Scott & Viiri 2004).

#### 2.2.4 Sosiaalinen vuorovaikutus tukee oppimista

Merkitysten maailma rakentuu sosiaalisessa vuorovaikutuksessa (Rauste-von Wright ym. 2003). Oppiessaan käyttämään kieltä kommunikaation välineenä oppija sosiaalistuu kulttuuriin ja sille ominaisiin merkitysrakenteisiin. Samankaltainen prosessi on kyseessä, kun aloitteleva fysiikan väitöskirjatutkija vähitellen omaksuu tutkimusryhmän ”kielen” eli tutkijayhteisön käyttämän fysiikan sanaston ja ryhmän kulttuurin.

Perinteisiä yliopisto-opetuksen menetelmiä on kritisoitu, koska ne eivät edistä yhteis- ja ryhmätöytäitojen, viestintätaitojen tai päätöksentekotaitojen kehittymistä. Nämä sosiaaliset taidot ovat kuitenkin tarpeellisia kaikkien alojen asiantuntijatehtävissä. Oppimisympäristöön tulisi sisältyä yhteistoiminnallisia oppimismuotoja, jotka mahdollistavat tiedon jakamisen, keskustelun ja argumentoinnin (Tynjälä 1999). Nämä ovat lisäksi luonnollisia tieteen tekemisen prosesseja ja kokeellisen fysiikan opetuksen kulmakiviä. Erityisesti argumentoinnin tärkeyttä ja luonnontieteen tarjoamia mahdollisuuksia sen harjaannuttamisessa on viime aikoina korostettu luonnontieteen oppimisen ja opetuksen tutkijoiden kansainvälisissä tapaamisissa, ja se on Iso-Britanniassa noussut erääksi luonnontieteiden opetussuunnitelman perusajatuksista (Osborne 2005). Vaikka oppiminen voidaan toisaalta ajatella yksilölliseksi prosessiksi, on sosiaalisella vuorovaikutuksella oppimiselle huomattava merkitys, koska sen kautta oppija voi tehdä ajatteluaan näkyväksi, saada sosiaalista tukea ja antaa sitä muille oppijoille. (Tynjälä 1999)

#### 2.2.5 Oppiminen käsitteellisenä muutoksena

Puhuttaessa käsitteellisestä muutoksesta tarkoitetaan oppimista, joka muuttaa oppijan olemassa olevia käsityksiä. Käsitteellisellä muutoksella voidaan viitata sekä käsitteen muutosprosessiin että muutoksen lopputulokseen. (Chi ym. 1994)

DiSessa ymmärtää käsitteellisen muutoksen eri kontekstien välisten yhteyksien ja keskinäisten prioriteettien järjestelyksi sirpalemaisessa tietorakenteessa. Oppiminen johtaa primitiivijonoissa tapahtuviin muutoksiin, jota tapahtuu oppijan kiinnittäessä huomiota vastauksensa perusteluihin ja selityksiin. DiSessan primitiivit kuuluvat käsittehierarkiassa käsitteiden alapuolelle ja niiden avulla on pystytty selittämään useita virhekkäisyyksiä. (diSessa 1993; diSessa ym. 2004)

Vosniadoun (1994) mukaan käsitteellinen muutos on yksinkertaisimmillaan olemassa olevan käsitteellisen rakenteen rikastuttamista. Tällöin oppija lisää uuden

tiedon olemassa olevaan käsiterakenteeseensa. Rikastuttaminen tapahtuu, kun opittava tieto on yhdenmukainen aiemman tiedon kanssa, ja se on oppijalle suhteellisen helppoa.

Opittavan tiedon ollessa ristiriidassa aiemman tiedon kanssa, vaaditaan käsitteellisen rakenteen muuttamista. Nimenomaisteorioita on kuitenkin helpompi muuttaa opetuksen avulla kuin kehysteorioita. Kehysteoria rajoittaessa nimenomaisteorian uskomuksia, on käsitteellinen muutos oppijalle hyvin vaativa. Kehysteorian muuttaminen on vaikeaa, koska sen oletukset muodostavat suhteellisen koherentin, arkikokemuksiin perustuvan rakenteen, joka on saanut vahvistusta useiden vuosien ajan. Lisäksi ontologiset ja epistemologiset oletukset muodostavat oppijan tietojen perustan, jolloin niiden muuttaminen vaikuttaa kaikkiin niihin tietorakenteisiin, jotka oppija on rakentanut niiden varaan. (Vosniadou 1994)

Oppimisen epäonnistumiset Vosniadou (1994) jakaa kolmeen kategoriaan. *Epäjohdonmukaisuuksia* syntyy oppijan lisätessä ristiriitaista tietoa olemassa oleviin tietorakenteisiinsa. *Inertiä tietoa* muodostuu, kun oppija varastoi yhteensopimatonta tietoa erilliseen tietorakenteeseen ja käyttää tietoa vain tietyssä kontekstissa. *Virhekäsityksiä* puolestaan syntyy oppijan yrittäessä sovittaa yhteen ristiriitaiset tiedon osat muodostaen synteettisen mentaalimallin.

Chi ym. (1994) näkevät käsitteellisen muutoksen prosessina, jossa oppija tunnistaa virheelliset käsityksensä ja pyrkii korjaamaan ne. Virhekäsitykset ovat oppijan väärin kategorioihin sijoittamia käsitteitä, joten käsitteellinen muutos on käsitteiden järjestämistä oikeisiin kategorioihin. Chin ja muiden teoriaa on sovellettu esimerkiksi oppijoiden astronomiaan liittyvien käsitysten luokitteluun (Johnston & Southerland 2000) sekä voiman ja sähkövirran käsitysten luokitteluun ja ymmärtämiseen (Chi ym. 1994) ja se näyttää selittävän myös fysiikan eksperttien ja noviisien ajattelun eroja (Slotta ym. 1995). Teorian avulla on myös pyritty selittämään tiettyjen fysiikan käsitysten pysyvyyttä (Chi 2005).

## 2.3 Opetuksella kohti käsitysten muuttumista

### 2.3.1 Oppimisesta ja opetuksesta

Opetus on intentionaalista toimintaa; oppijan tavoitteena on jonkin tiedon tai taidon oppiminen ja opettajan tavoitteena oppijan oppimaan saattaminen. Opettajan rooli on kuitenkin muuttunut karttakeppipedagogiikkaa noudattavasta tiedonjakajasta oppimisen ohjaajaksi ja tukijaksi. (Aho 2002) Opettajan käyttämästä pedagogiikasta riippumatta oppiminen on aktiivinen ja jatkuva prosessi, jossa oppija rakentaa kuvaansa maailmasta ja sen ilmiöistä aiempien tietojensa, käsitystensä ja uskomustensa pohjalta sosiaalisessa vuorovaikutuksessa muiden oppijoiden kanssa (Tynjälä 1999), ja johon motivaatio ja

muut oppijaan liittyvät henkilökohtaiset tekijät vaikuttavat (Aho 2002). Oppiminen ei ole pelkästään uusien asioiden omaksumista vaan myös jo opittujen asioiden uudelleen organisointia, joten merkityksettömältä vaikuttanut seikka voi muuttua merkitykselliseksi opitun uudelleen organisoinnin tuloksena (Saariluoma, Kamppinen & Hautamäki 2001). Viime kädessä oppimisessa on täten kyse oppijan käsitteiden merkitysten (Rauste-von Wright ym. 2003) eli käsitysten muuttumisesta.

Oppiminen on oppijan oman toiminnan tulos, ja oppijan käyttämien oppimisstrategioiden on havaittu heijastavan hänen oppimisprosessiaan. Oppimisstrategioiden käyttö riippuu siitä, millaisena oppijana näkee roolinsa oppimisessaan: kokeeko hän olevansa itse vastuussa oppimisestaan vai odottaako hän opettajan ohjaavan häntä. Käytetystä oppimisen strategiasta riippuu myös se, mitä opitaan, eikä vain se miten opitaan. Tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että esimerkiksi faktojen oppimiseen keskittyvät oppijat oppivat faktoja huonommin kuin kokonaisvaltaiseen ymmärtämiseen keskittyvät oppijat. (Rauste-von Wright ym. 2003)

Opetuksessa on tärkeää kartoittaa sekä oppijoiden käsityksiä opetuksen kohteena olevista ilmiöistä ja käsitteistä opetuksen alkaessa että myös millaisia laadullisia muutoksia käsityksissä tapahtuu opetuksen kuluessa. Vastaavasti oppimisen tuloksia arvioitaessa on usein oleellisempaa selvittää, miten asiat on ymmärretty eli miten oppijat ovat tulkinneet opiskeltavat asiat, kuin miten paljon on opittu. (Rauste-von Wright ym. 2003)

Tenteillä tapahtuva opiskelijan arviointi pahimmillaan vaikeuttaa hänen oppimisprosessiaan johtaen pinnalliseen ulkoa opetteluun asioiden ymmärtämisen sijasta (Tynjälä 1999). Oppijoiden tietoisuus arvioinnin kriteereistä ohjaa oppimistoimintaa, ja esimerkiksi tentit voivat määritellä yliopisto-opiskelijoille hyvän oppimisen, jossa arviointi on prosessin loppupisteen mitta. Suorituspainotteisessa opiskelussa, joka pahimmillaan on täppikysymysten ulkoa opettelua, oppijan oivallusten ja käsitteellisten muutosten prosessien tapahtuminen jää evaluoimatta, ja mahdolliset ongelmat ja ymmärtämättä jääneet asiat ilmenevät usein varsin kaottisina ja vasta opintojen loppuvaiheessa. (Rauste-von Wright ym. 2003)

### 2.3.2 Oppijoiden käsitysten luonteesta

Puhuttaessa *käsityksestä* halutaan korostaa oppijan henkilökohtaista tulkintaa käsitteestä tai ilmiöstä. Yksilöiden samaa ilmiötä, asiaa tai käsitettä koskevat tulkinnat ovat laadullisesti erilaisia henkilöiden erilaisten kokemustajustojen vuoksi (Syrjälä, Ahonen, Syrjäläinen & Saari 1995). Yksilön olemassa olevat käsitykset muodostavat pohjan sille, miten hän ymmärtää uuden kokemuksen. Käsitykset ovat luonteeltaan dynaamisia eli ne voivat muuttua useita kertoja lyhyessäkin ajassa. Konstruktivistiseen paradigmaan

nojaten yksilön konstruoimat tulkinnat käsitteille ovat viime kädessä aina käsityksiä, olipa kyse sitten opettajasta tai oppilaasta.

Oppijoiden käsityksiä luonnontieteen käsitteistä ja ilmiöistä on tutkittu laajasti. Esimerkiksi Pfundt ja Duit (1989) ovat listanneet 1500 oppijoiden eri luonnontieteen aihealueiden virhekäsityksiä, eli tieteellisen tiedon kanssa ristiriidassa olevia käsityksiä, kartoittavaa tutkimusta<sup>8</sup>. Tutkimuksissa on käynyt ilmi, että oppijoiden olemassa olevat käsitykset ovat usein ristiriitaisia tai yhteensopimattomia opiskeltavien käsitteiden kanssa.

Millar (1989) ja Chi ym. (1994) ovat esittäneet oppilaiden käsitysten luonnetta koskevia väittämiä. Millar tarkastelee oppilaiden käsityksiä luonnontieteen opetuksen ja oppimisen näkökulmasta, kun Chi ja muut tarkastelevat käsityksiä kognitiivisen psykologian katsantokannalta. Millarin ja Chin ym. näkemyksiä vertaillaan taulukossa 2.2 (s. 21).

Taulukossa 2.2 esitetyt väitteet M1 ja M2 ovat konstruktivistisen oppimisenäkemyksen perusolettamuksia. Oppijoiden heterogeenisista taustoista johtuen oppijat tulkitsevat opetuksessa käsiteltäviä asioita eri tavoin. Väitteet M3, M4, C1 ja C2 liittyvät oppijoiden käsitysten yleispätevyyteen. Esimerkiksi kreikkalaisten ja amerikkalaisten lasten Maa-käsitykset ovat osoittautuneet samankaltaisiksi (Vosniadou 1997), ja fysiikan yliopisto-opiskelijoilla on esiintynyt samankaltaisia käsityksiä sähkövirrasta kuin useissa alemmilla koulutusasteilla tehdyissä tutkimuksissa on ilmennyt (Hirvonen 2003). Myös tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että fysiikan opettajien ja opiskelijoiden elektronikäsitykset voivat olla pohjimmiltaan samankaltaisia kuin lukiolaisten käsitykset elektronista (Asikainen, Koponen & Hirvonen 2006).

Oppijoiden käsitykset muistuttavat usein tieteen historiassa esiintyviä käsityksiä (väitteet M5 ja C3). Aristoteleelle voima oli kappaleen ominaisuus, ja tämän kaltainen käsitys on tutkimuksissa havaittu eri ikäisillä oppijoilla (Halloun & Hestenes 1985). Einstein ajatteli fotonin aluksi valon rakenneosaksi, valokvantiksi (Pais 1982). Kyseinen oppikirjoissa yhä esiintyvä käsitys ilmeni myös käsillä olevaan tutkimukseen osallistuneilla opiskelijoilla (Asikainen ym. 2006).

Käsitteellisten vaikeuksien voittaminen pelkästään kuuntelemalla luentoja ja ratkomalla standarditehtäviä on hyvin harvinaista: oppijoiden fysiikan käsitykset ovat osoittautuneet hyvin vastustuskykyisiksi perinteisiä opetusmenetelmiä kohtaan (Vokos ym. 2000; Mannila ym. 2002; McDermott 1990; Millar 1989). Mikäli oppiminen vaatii suhteellisen suuren käsitteellisen muutoksen eli opiskeltava asia tai käsite poikkeaa hyvin paljon oppijan käsityksestä, johtaa pelkkä luento-opetus harvoin oppimiseen (Bransford ym. 1999). Väittämästä C5 tutkijat eivät ole yksimielisiä. Samoin tutkijat ovat esittäneet erilaisia teorioita käsitysten järjestäytyneisyydestä (väite C6).

---

<sup>8</sup> Nykyisellään Duitin ylläpitämässä sivustossa on yli 7000 lähdetä, ks. <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>



**Taulukko 2.2.** Millarin (1989) ja Chin ym. (1994) näkemykset oppilaiden käsitysten luonteesta.

Millar (1989)	Chi ym. (1994)
M1. Opiskelijoilla on aina jonkinlaisia käsityksiä opetettavista ilmiöistä. Opiskelijoiden käsitykset ovat usein ristiriitaisia formaalissa opetuksessa esitetyn tiedon kanssa.	
M2. Käsitysten juuret ovat opiskelijan omassa kokemusmaailmassa, havainnoissa, kulttuurissa, kielessä, koulussa ja koulutuksessa.	
M3. Käsitykset ovat samankaltaisia ikään, kykyihin, sukupuoleen tai kansallisuuteen katsomatta. M4. Opettajien käsitykset ovat samankaltaisia kuin opiskelijoiden.	C1. Oppilaiden käsitykset ovat ”itsepintaisia”. Lukiolaisilla esiintyy yhä samankaltaisia käsityksiä kuin alakoululaisilla. C2. Oppilaiden käsitykset ovat homogeenisia: eri ikäkausina tai eri tutkimuksissa ilmaisemat käsitykset ovat samanlaisia.
M5. Opiskelijoiden käsitykset ovat usein samankaltaisia kuin tiedemiesten käsitykset tieteen historiassa.	C3. Käsitykset ”toistuvat” historiallisten aikakausien halki. Oppilaiden käsitykset ovat samankaltaisia kuin keskiaikaisten tiedemiesten.
M6. Opiskelijoiden käsitykset ovat vastustuskykyisiä muutoksille tavallisia opetuksen lähestymistapoja käytettäessä.	C4. Oppilaiden käsitykset ovat robusteja eli luonteeltaan pysyviä ja niiden muuttaminen on vaikeaa.
	C5. Oppilaiden käsitykset ovat johdonmukaisia ajasta ja tilanteesta riippumatta: oppilas voi ilmaista saman käsityksen tietyn ajan kuluttua ja eri kontekstissa. C6. Käsitysten systemaattisuudesta ei olla toistaiseksi yksimielisiä. Käsitykset saattavat muodostaa koherentin teorian tai sirpalemaisen rakenteen.

### 2.3.3 Mentaalimalleista

Mentaalimallin käsitteelle ei löydy yksikäsitteistä määritelmää. Gutierrezin (2002) mukaan erityisesti fysiikan oppimista käsittelevässä tutkimuskirjallisuudessa mentaalimallin käsite on monimerkityksinen: toisinaan tutkimusartikkelin lukijan on vaikea ymmärtää, mitä kirjoittaja mentaalimallin käsitteellä tarkoittaa. Aiempien kvanttifysiikan oppimista tarkastelevien tutkimusten ymmärtämiseksi on kuitenkin tarpeen hieman esitellä mentaalimallien teoriaa, vaikka tässä työssä ei siihen nojaudutakaan.

Kognitiivisen psykologian alaan kuuluvan Johnston-Lairdin työhön nojaavan mentaalimalliteorian mukaan yksilöt muodostavat mentaalimalleja ennako-oletustensa pohjalta, ja käyttävät niitä johtopäätösten tekemiseen päättelysääntöjen sijasta (Eysenck & Keane 2005). Teorian mukaan yksilö pyrkii muodostamaan vaihtoehtoisia malleja, jotka falsifioivat aiemman mallin perusteella tehdyt johtopäätökset. Mikäli tällaista mallia ei löydy, jää aiempi malli voimaan. Lisäksi yksilö pyrkii minimoimaan työmuistin kuormitusta konstruoiden malleja, jotka esittävät eksplisiittisesti vain sen mikä on totta. Toisinaan mentaalimallit johtavat virheettömään päättelyyn, mutta yleensä eivät. Oppijan päättely on ristiriidatonta, kun hänen käyttämänsä mentaalimallit ovat tarkasteltavaan tilanteeseen sopivat. Sen sijaan oppijan soveltamien mallien ollessa ristiriidassa tarkasteltavan tilanteen kanssa johtaa päättely ristiriitaan. (Eysenck & Keane 2005)

Mentaalimalliteoria ei kuitenkaan pysty selittämään alkuperäisten mentaalimallien muodostumista tai sitä, miten yksilö valitsee malliin liitettävät tiedon osat. Tutkimuksissa on lisäksi havaittu, etteivät yksilöt pyri systemaattisesti uusien mallien konstruointiin alkuperäismallin korvaamiseksi. (Eysenck & Keane 2005) Yksilöiden mentaalimallien on lisäksi todettu olevan usein pysymättömiä, epätäydellisiä ja tieteellisen näkemyksen vastaisia. (Norman 1983) Toisaalta Lehtisen ja Kuusisen (2001) mukaan tämä on juuri mentaalimalliteorian anti oppimisen tutkimukselle: ihmisen toiminta ja ajattelu on epäloogista ja epäjohdonmukaista, joten esimerkiksi luonnontieteen käsitteiden ymmärtäminen voi opetuksen jälkeen osoittautua puutteelliseksi, mikäli oppijoiden mentaalimalleja ei oteta huomioon opetuksessa.

Vosniadoun (1994; 2002) mukaan yksilö konstruoi suurimman osan mentaalimalleista reaaliaikaisesti tietyssä tilanteessa, mutta on myös mahdollista, että osa mentaalimalleista on varastoituneena yksilön pitkäaikaisessa muistissa. Gilbert ym. (2000) kutsuvatkin yksilön esittämiä malleja ilmaisumalleiksi korostaen näin näkemystä, jonka mukaan ilmaisu muuttaa yksilön mentaalimallia. Konstruktivistisen paradigman näkökulmasta oppijan malleista saatava tieto konstruoituu kyselijän ja tietäjän välisessä vuorovaikutuksessa (Guba & Lincoln 1994), joten oppijan mentaalimalleista vuorovaikutteisten tutkimusmenetelmien avulla saatavan tiedon

voidaan olettaa vain kuvastavan oppijan mentaalimalleja, eikä vastavan niitä sellaisenaan (ks. esimerkiksi Vuorinen ym. 1995).

#### 2.3.4 Oppijan tiedon huomioiminen opetuksessa

”Opetuksen lähtökohtana tulisi olla oppijan tapa hahmottaa maailmaa ja sen tulkintaan käytettyjä käsitteitä: tämän varassa oppija (re)konstruoi opetuksen sisällöt”, esittävät Rauste-von Wright ym. (2003). Heidän mukaansa kaikkeen kommunikointiin tarvitaan yhteisen kielen lisäksi myös yhteinen viitekehys viestien tulkintaa varten. Viestintää säätelevät viestin lähettäjän ennako-oletukset vastaanottajan tavasta tulkita viesti. Jos esimerkiksi opettajan viestintä on yksisuuntaista, ovat hänen mahdollisuutensa täsmentää tekemiään ennako-oletuksia vähäiset.

Oppijoiden käsitysten huomioimiseksi opetuksessa tulisi käyttää menetelmiä, jotka mahdollistavat oppijoiden omien tulkintojen esille tuomisen ja niistä keskustelun (Tynjälä 1999). Eri koulutustasoilla ja eri oppiaineiden konteksteissa tehtyjen tutkimusten tulokset ovat osoittaneet oppimistulosten parantuvan, kun opettaja huomioi oppijoiden käsitykset ja uskomukset opetuksessaan ja seuraa oppijoiden käsitysten muuttumista opetuksen edetessä. (Bransford ym. 1999)

Yleinen konstruktivismiin liittyvä virheellinen käsitys on, että opettajan ei tule kertoa opiskelijoille mitään suoraan vaan hänen tulee aina sallia opiskelijoiden konstruoida tieto itse. Konstruktivistisen ajattelun mukaan oppijan tieto rakentuu olemassa olevalle tiedolle, riippumatta siitä miten tietoa opetetaan. Jopa luentojen kuuntelu voi olla aktiivista uuden tiedon konstruointia ja ”kertomalla opettaminen” voi olla toimiva menetelmä, jos oppijat ovat ensin itse saaneet pohdiskelleet asiaa. (Bransford ym. 1999)

#### 2.3.5 Oppijalähtöisiä opetuksen lähestymistapoja

Konstruktivistisen oppimiskäsityksen moniulotteisesta luonteesta johtuen on vaikea kehittää sellaisia opetuksen lähestymistapoja, joissa kaikki osatekijät tulisivat samanarvoisesti huomioituiksi. Rauste-von Wright ym. (2003) mainitsevat kaksi konstruktivistisiin lähtökohtiin perustuvaa lähestymistapaa: ongelmaperustainen ja ilmiökeskeinen oppiminen. Lisäksi Yhdysvalloissa on kehitetty fysiikan yliopisto-opetukseen soveltuvia opetuksen lähestymistapoja. Näistä esitellään vuorovaikutteisten luentojen menetelmä<sup>9</sup> ja SCALE-UP -strategia.

*Ongelmaperustaisessa oppimisessä* (PBL) oppiminen rakentuu aitojen, opetusryhmässä esiin nousevien ongelmien ympärille. Ongelma voi olla joko laaja ilmiö, jolle ei välttämättä löydy ratkaisua, tai se voi olla selvästi rajattu ja sen ratkaisun

---

<sup>9</sup> Engl. Interactive Lectures

oikeellisuus arvioitavissa. Ongelmaperustaisessa oppimisessa maailmaa tarkastellaan toisiinsa liittyvien ilmiöiden kokonaisuutena. Opetuksessa tähdätään tieteellisen maailmankuvan oppimiseen aktivoimalla oppijaa oman maailmankuvansa kyseenalaistamisessa. Tärkeä ongelmaperustaisen oppimisen osatekijä on ilmiöiden problematisointi: siirryttäessä laajoista kokonaisuuksista pienempiä kokonaisuuksia kohti etsitään vastauksia oppijoiden kysymyksiin ja muotoillaan niitä uudelleen uuden tiedon ja kokemuksen näkökulmasta. (Rauste-von Wright ym. 2003)

*Ilmiökeskeisessä lähestymistavassa* oppija löytää itse tai opettajan avustuksella käsiteltävän aiheen ydinilmiöt. Oppijan on opittava kysymään itseltään, mitkä tekijät ovat oleellisia ja mitä seikkoja hänen on pohdittava kokonaisuuden ymmärtämiseksi. Oppimisympäristön tulee tukea oppijan omien kysymysten heräämistä, jotka ovat oppijan oppimisprosessia eteenpäin vieviä tekijöitä. Opettajalta ilmiöperustainen oppiminen vaatii ilmiöiden tieteellisen perustan hallinnan lisäksi vuorovaikutustaitoja ja oppijoiden valikoivan tarkkaavaisuuden suuntautumisen hallintaa. (Rauste-von Wright ym. 2003)

*Vuorovaikutteisten luentojen menetelmä* perustuu Mazurin Peer Instruction -menetelmään, jota Meltzer ja Manivannan (2002) ovat kehittäneet edelleen tavoitteenaan opettajan ja opiskelijoiden välisen vuorovaikutuksen lisääminen ja sen laadun parantaminen yliopistofysiikan kursseilla. Opetus rakentuu opettajan esittämille monivalintakysymyksille, joihin opiskelijat vastaavat ensin mielessään, sitten keskustelevat näkemyksistään toistensa kanssa, ja opettajan pyytäessä vastausta esittävät mielestään oikean vastausvaihtoehdon opettajalle flash-kortin avulla. Opettaja huomioi opiskelijoiden vastaukset rätätälöiden jatkokysymykset ja keskustelun siten, että opiskelijoiden sen hetkinen tietämyksen taso tulee mahdollisimman hyvin huomioituksi. Vuorovaikutteisten luentojen menetelmässä luentoaikaa ei käytetä lainkaan fysiikan periaatteiden yksityiskohtaiseen johtamiseen ja täydelliseen selittämiseen, vaan tätä tarkoitusta varten opiskelijoilla on luentomonisteet, joihin he perehtyvät omatoimisesti luentojen ulkopuolella. Tutkimustulosten mukaan vuorovaikutteista luentomenetelmää soveltavalla kurssilla opiskelijoiden käsitteellistä ymmärrystä mittaavan testin tulokset olivat huomattavasti paremmat perinteisesti opetettuun kurssiin verrattuna. (Meltzer & Manivannan 2002)

Fysiikan ja kemian college-opetuksessa käytetyssä *SCALE-UP-menetelmässä*<sup>10</sup> on pyritty luomaan vuorovaikutteisia oppimisympäristöjä opiskelijamääriltään suurille kursseille. Kollaboratiivisuus, tietokoneavusteisuus ja käytännön harjoitukset ovat menetelmän keskeisiä osia. Opiskelijat perehtyvät opetuksessa käsiteltävään aiheeseen kirjalliseen materiaaliin jo ennen luentoa siihen liittyviä tehtäviä ratkoen. Näin varmistutaan, että opiskelijat ovat hyvin valmistautuneita luennoille tullessaan ja

---

<sup>10</sup> Engl. Student Centered Activities for Large Enrollment Undergraduate Programs

pystyvät suoriutumaan tavanomaista vaativammista tehtävistä kontaktiopetuksessa. Aiheiden käsittelyn laajuus on sama kuin tavallisilla luentojaksoilla. Perinteisen tyyppiset luennot eivät ole täysin pois suljettuja, mutta yleensä luento-opetus jaetaan 10-15 minuutin jaksoihin, jotka käytetään aineiston organisointiin, opiskelijoiden motivointiin, oppimateriaalin täydentämiseen tai sovellusten esittelyyn. (Beichner, Saul, Allain, Deardorff & Abbott 2000; Beichner & Saul 2003)

Edellä esitellyissä opetuksen lähestymistavoissa käy hyvin ilmi nykyaikainen näkemys oppijan ja opettajan rooleista. Oppija nähdään aktiivisena toimijana, joka ottaa vastuuta omasta oppimisestaan. Opettaja toimii oppimisen tukijana ja oppimiseen ohjaajana pyrkien räätälöimään oman toimintansa oppijoiden tietoja ja taitoja mahdollisimman hyvin vastaavaksi. On kuitenkin syytä muistaa, että oppiminen on monisyinen prosessi, jota tapahtuu myös varsinaisten opetustilanteiden tai -tapahtumien ulkopuolella. Lisäksi oppijat ovat yksilöitä, eivätkä modernit opetuksen lähestymistavat välttämättä sovi kaikkien opiskelijoiden oppimistyyliin. Mikäli oppijat ovat tottuneet perinteisiin opetusmenetelmiin, uusiin menetelmiin siirryttäessä on odotettavissa muutosvastarintaa ainakin alkuvaiheessa.

## 2.4 Mallit ja fysiikka

### 2.4.1 Mallien luokittelua

Mallin käsite saa useita eri merkityksiä. Se voi kuvata konkreettista oliota tai esittää abstrakteja käsitteitä. Mallin avulla voidaan myös kuvata prosesseja, systeemejä tai tapahtumia. Myös ajatuskoe on malli. Malleja tuotetaan myös tuntemattomien olioiden tai ilmiöiden selittämistä varten. *Selittävät mallit* ovat erityisen tyypillisiä mikromaailman ilmiöitä ja oliota tarkastellessa. (Harré 2002)

Tieteen näkökulmasta mallit voidaan jakaa *rakenne- ja prosessimalleihin*. Rakennemalleja käytetään tunnettujen olioiden tai prosessien kuvaamiseen ja ne ovat merkityksellisiä tieteen historiassa. Prosessimalleja taas tuotetaan, kun tarkastellaan tuntematonta tai monimutkaista ilmiötä tai prosessia. Prosessimallit kiinnittyvät yleensä samanaikaisesti useampaan teoriaan tai käsitejärjestelmään ja ovat täten merkittäviä uuden tiedon luomisessa. (Harré 1970 tulkiten)

Mallien luokittelun lähtökohtana voidaan käyttää myös niiden ontologista asemaa. Gilbertin ym. (2000) mukaan *mentaalmallit* ovat yksilön sisäisiä malleja eli kognitiivisia representaatioita, joita hän käyttää tarkasteltavan ilmiön pohdintaan, kuvailuun, selittämiseen ja hypoteesien esittämiseen. Oppijan ilmaistessa mentaalimalliaan malli muuttuu, jolloin sitä voidaan kutsua *ilmaisumalliksi*. Ilmaisumallit voidaan edelleen kategorisoida esitystapojen perusteella *konkreettiseksi* ja

*symbolisiksi malleiksi*. Ilmaisumallit voivat olla joko hyvin lyhytikäisiä tai niistä voi tulla laajasti sosiaalisessa yhteisössä hyväksytyjä *konsensusmalleja*. Tieteessä tiedemiehet tuottavat runsaasti ilmaisumalleja tutkimilleen ilmiöille. Ilmaisumallista, joka on saavuttanut tiedeyhteisön hyväksynnän kokeellisen verifioinnin tuloksena ja julkaistu tieteellisessä julkaisussa, tulee *tieteellinen malli*. Tiedeyhteisön hyväksymä konsensusmalli, joka on korvautunut selitysvoimaisemmalla mallilla tunnetaan *historiallisena mallina*. (Boulter & Buckley 2000)

Mallin muodostamisprosessi on seuraavanlainen. Tarkasteltava ajatus tai käsite pelkistetään yksinkertaisimpaan muotoon, jonka perusteella oletusten tekeminen on mahdollista. Idean kehittyessä mallista tulee monimutkaisempi ja sofistikoituneempi, ja se muuntuu konkreetista kaaviomaisen kautta symboliseen muotoon. Mallin viimeinen muoto on yleensä alkuperäistä muotoa selitysvoimaisempi ja sen yhteydessä tarvittavien oletusten määrä on pienempi. On myös mahdollista, että olemassa olevien mallien lisäksi esitetään uusia malleja tietyn ilmiön selittämiseksi ja uudesta mallista voi lopulta tulla hyväksyty malli. (Rutherford 2000)

Symboliset mallit, joista tavallisimpia ovat matemaattiset yhtälöt, ovat fysiikassa kaikkein arvostetuimpia, koska niiden avulla voidaan tehdä kehittyneitä ennusteita ja laajentaa tutkimuksen kenttää. Ennusteet johtavat ilmiön parempaan ymmärrykseen ja tuntemukseen, ja edelleen mallin modifiointiin tai jopa radikaaliin muuttamiseen. Mikäli mallin antamaa ennustetta pidetään parhaimpana selityksenä tutkittavalle ilmiölle, saa kyseinen malli vieläkin suuremman merkityksen. Mallien kehittämistyön tuloksena saadaan tietty malli, joka hyväksytään parhaimpana olemassa olevana. Kehitystyön jatkaminen laajentaa tai jalostaa mallia. (Rutherford 2000)

#### 2.4.2 Mallit opetuksessa

Esittävät mallit ja idealisaatiomallit ovat yleisesti fysiikan opetuksessa käytettyjä malleja. *Esittävät mallit* ovat analogisia jonkin esineen tai asian kanssa, kuten esimerkiksi sähkömoottorin rakennetta ja toimintaa kuvaava pienoismalli. *Idealisaatiomallit* eli idealisaatiot sen sijaan ovat idealisoituja muotoja jostain esineestä tai asiasta. Esimerkiksi kytkentäkaavio on idealisoitu virtapiiriin malli. Idealisaatiomalleja kutsutaan myös *analyttisiksi malleiksi* (Harré 2002), ja niissä lähde<sup>11</sup> eli mallin alkuperä ja kohde eli se mitä malli kuvaa, ovat samat.

*Analogiamalli* eli analogia on malli, jonka lähde ja kohde eivät ole samat. Esimerkiksi atomin rakennetta esittävän planeettamallin lähde on aurinkokunta ja kohde atomi. (Harré 2002) Analogiamallit ovat osoittautuneet tehokkaaksi keinoksi opettaa entuudestaan tuntemattomia aiheita edellyttäen, että selittäjä ja kuuntelija ymmärtävät analogian samalla tavalla (Harrison 2001).

---

<sup>11</sup> Saari (2000) kutsuu lähettä ankkuriksi.

Muita opetukseen liittyviä malleja ovat esimerkiksi opetus-, hybridi- ja pedagogiset mallit. Koska konsensusmallien ja historiallisten mallien ymmärtäminen sellaisenaan on usein vaikeaa, on ymmärtämisen helpottamiseksi kehitetty *opetusmalleja*. *Hybridimalli* on sen sijaan muodostettu yhdistämällä useiden erillisten tieteellisten tai historiallisten mallien piirteitä joko tarkoituksella tai tahattomasti, ja opetuksessa sitä käytetään ikään kuin se olisi yhtenäinen malli. *Pedagogista mallia* opettaja käyttää opetusta suunnitellessaan, opettaessaan ja opetustaan reflektoidessaan, ja se pitää sisällään näkemyksen sekä tieteen että sen opettamisen ja oppimisen luonteesta. (Boulter & Buckley 2000)

Mallien käyttö opetuksessa ei kuitenkaan ole ongelmatonta. Tutkimuksissa on käynyt ilmi, että opiskelijoilla on vaikeuksia ymmärtää samaa ilmiötä kuvaavien mallien toisistaan poikkeavat piirteet ja pätevyysalueet, kuten eri atomimallit (Euler ym. 1999) tai aineen rakennetta kuvaavat mallit (Harrison & Treagust 2000). Oppilaat saattavat myös usein olla naiiveja realisteja, jotka ajattelevat, että malli ja todellisuus vastaavat täysin toisiaan, mallit ovat lelujen kaltaisia ja niiden sisältämät piirteet voidaan valita mielivaltaisesti (Grosslight, Ubger, Jay & Smith 1991). Lisäksi oppijat voivat ajatella duaalisesti: representaatiot ovat oikein tai väärin tai hyviä tai huonoja. Esimerkiksi Harrisonin ja Treagustin haastattelemista yläkoulu- ja lukioikäisistä oppilaista monet uskoivat, että tavalliset oppikirjoissa ja opetuksessa käytettävät atomimallit ovat ”totta”. (Harrison 2001) Syyksi tutkijat epäilevät opettajien ja oppikirjojen tapaa käyttää malleja käsitteiden selittämiseen. Opettajien on lisäksi todettu usein nojaavan vahvasti oppikirjoihin oppituntiansa sisällön ja prosessien suunnittelussa (Sánchez & Valcárcel 1999) ja kiinnittävän huomiota mallien oikeellisuuteen niiden hyödynnettävyyden asemasta (Van Driel & Verloop 1999). Opettaja ja oppilaat näkevät analogian omista lähtökohdistaan käsin; pahimmillaan itse analogisuus jää oppilailta kokonaan huomaamatta (Duit, Roth, Komorek & Wilbers 2001)

Fischlerin ja Lichtfeldtin (1992) mukaan kvanttifysiikassa vaikeasti omaksuttavien käsitteiden yksinkertaistaminen<sup>12</sup> johtaa oppimisen ongelmiin useammin kuin muissa fysiikan aihealueissa, ja erityisesti vaarana ovat helposti omaksuttavat, arkikäsitteitä sisältävät opetusmallit, kuten Bohrin atomimalli<sup>13</sup>. Opetusmallit tulisi heidän mukaansa pyrkiä rakentamaan siten, että ne ovat laajennettavissa, eikä oppijoiden tarvitse myöhemmin määrittellä peruskäsityksiään uudestaan.

---

<sup>12</sup> Implisiittisesti Fischler ja Lichtfeldt viittaavat tässä opetusmallien luomiseen.

<sup>13</sup> Bohrin atomimalli on analogiamalli silloin kun se kuvaa atomin rakennetta. Kun Bohrin atomimallia käytetään emissio- tai absorbtio- prosessien esittämiseen, se voidaan ajatella prosessimalliksi. Bohrin atomimallia käytetään Suomessa perusasteen fysiikan ja kemian opetuksessa.

## 2.5 Kvanttifysiikan oppimisen erityispiirteitä

Kvanttifysiikka on fysiikan osa-alue, joka kehittyi 1900-luvun alussa, kun tiettyjä aineen ja sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutusilmiöitä, kuten mustan kappaleen säteilyä, valosähköistä ilmiötä tai Comptonin ilmiötä, tai absorptio- ja emissioprosesseja atomeissa, ei kyetty täysin selittämään klassisten teorioiden avulla. Taulukkoon 2.3 on koottu kvanttifysiikan teorian kehittäjiä heihin liittyvine ilmiöineen tai periaatteineen.

Historiallisista syistä kvanttifysiikasta käytetään usein käsitettä kvanttimekaniikka, koska kvanttifysiikan ajateltiin olevan tavallaan Newtonin mekaniikan ”alahaara”. Bunge (2003) on esittänyt, että loogisempi nimi kvanttifysiikalle olisi kvantiikka (*quantics*), koska se olisi tuolloin samanmuotoinen esimerkiksi mekaniikan (*mechanics*) ja optiikan (*optics*) käsitteiden kanssa.

**Taulukko 2.3.** Kvanttifysiikan kehitykseen vaikuttaneet tutkijat kontribuutioineen (Mehra & Rechenberg 1982).

Vuosi	Tutkijat	Ilmiö tai periaate
~1900	Pierre Dulong, Alexis Petit, Henri Regnault	Kaasujen moolisten lämpökapasiteettien lämpötilariippuvuus
1901	Max Planck	Mustan kappaleen säteilyspektrin tulkinta
1905	Albert Einstein	Muiden muassa valosähköinen ilmiö ja mustan kappaleen säteily
1913	Niels Bohr	Atomien spektrien kvantittuminen
1922	Arthur Compton	Comptonin ilmiö
1925	Louis de Broglie	De Broglie'n hypoteesit
1926	Erwin Schrödinger	Aaltoyhtälö
1927	Werner Heisenberg	Epätarkkuusperiaate
1927	Clinton Davisson ja Lester Germer	Elektronin aaltoluonne
1927	Max Born	Aaltoyhtälön tulkinta



Konsensusnäkemystä siitä miten kvanttimekaniikkaa tulisi opettaa ei ole saavutettu. Oman lisänsä keskusteluun kvanttifysiikan opetuksesta tuo se tosiasia, että edes fyysikot eivät ole yksimielisiä kvanttimekaniikan formalismin tulkinnasta. (Johnston, Crawford & Fletcher 1998) Kvanttifysiikan oppimisen erityispiirteitä ja raportoituja oppimisen ongelmakohtia tarkastellaan seuraavaksi.

### 2.5.1 Kvanttifysiikan luonne oppimisen näkökulmasta

Newtonilaisen mallin mukaan tutkittavien ilmiöiden tarkastelu voidaan viime kädessä pelkistää tarkasti määriteltyjen ja mitattavien olioiden sekä niiden ominaisuuksien tarkasteluun. Arvostetuinta tietoa on sellainen, joka voidaan ilmaista käyttäen täsmällisiä, kontekstiriippumattomia yhtälöitä, jotka ovat sovellettavissa kaikkialla todellisuudessa. (Fuchs & Peres 1996; ks. myös Pospiech 2003)

Usein fysiikan opinnoissa tarkasteltavissa klassisissa tilanteissa fysikaalisen systeemin käyttäytyminen voidaan määrittää tarkasti. Tarkastelu kohdistuu kappaleen liikkeen yksityiskohtaiseen kuvaukseen tai sen ominaisuuksien mittaamiseen. Kvanttifysiikassa oppijan on kuitenkin luovuttava tästä klassisen fysiikan mekanistis-deterministisestä maailmankuvasta. (Pospiech 2003, ks. myös Kallio-Tamminen 2004) Mittaaminen ei ole enää olemassa olevien, usein aistein havaittavien, ominaisuuksien ”lukemista”, vaan mittaaminen häiritsee mittauksen kohdetta. Lisäksi konjugoitujen suureiden<sup>14</sup> samanaikainen määrittäminen ei ole mahdollista; mitä tarkemmin esimerkiksi kvanttihiukkasen paikka halutaan määrittää, sitä huonommin sen liikemäärä voidaan tuntea<sup>15</sup>. (Fuchs & Peres 1996) Klassisen fysiikan determinismi korvautuu tilastollisilla tulkinnoilla ja kausaalisuudesta on luovuttava.

Kvanttifysiikka on osoittautunut haasteelliseksi opetettavaksi fysiikan osa-alueeksi, jonka vaikeiden ja abstraktien aiheiden opettamisesta muille kuin kaikkein lahjakkaimmille opiskelijoille on vain vähän onnistuneita kokemuksia (Steinberg ja Oberem 2000). Esimerkiksi fotonikäsitteen kehittymisen kannalta tähdellisen valosähköisen ilmiön ymmärtäminen saattaa opetuksen jälkeen jäädä vaatimattomaksi, mikä voi edelleen vaikeuttaa esimerkiksi valon ja aineen välisen vuorovaikutuksen tai atomin energiatasojen ymmärtämistä. (Steinberg, Wittman, Bao & Redish 1996; Steinberg & Oberem 2000; ks. myös Asikainen, Hirvonen & Koponen 2005b)

Tutkimusten mukaan fysikaalisen intuition rakentamisen vaikeus voi myös johtaa opiskelijat ajattelemaan, että kvanttifysiikka on vain matematiikkaa ja unohtamaan käytettävän matematiikan valintaan johtaneet fysikaaliset periaatteet. Lisäksi opiskelijoiden näkemyksen fysikaalisesta tiedosta on todettu kvanttifysiikan kurssien

---

<sup>14</sup> Konjugoituja suureita ovat esimerkiksi energia ja aika sekä paikka ja liikemäärä.

<sup>15</sup> Heisenbergin epätarkkuusperiaate

vaikutuksesta siirtyvän kohti sirpalemaista, irrallisten palojen kokoelmaa koherentin tietorakenteen asemasta. (Bao & Redish 2002)

Mikäli oppimisympäristö ei tue oppijan käsitteellistä kehittymistä sekä aktiivisuutta merkitysten tarkastelussa ja uusien merkitysten muodostamisessa, on varsin epätodennäköistä, että oppijat onnistuvat kehittämään kvanttifysiikan opetuksen tavoitteena olevat mentaalimallit päättelyn, tutkimisen ja ongelmanratkaisun keinoin. (Johnston ym. 1998; Mashhadi & Woolnough 1999) Atomi-käsitteen ymmärtämisen liittyvän pilottitutkimuksen tulosten mukaan kvanttifysiikan käsitteiden korostaminen auttoi opiskelijoita parantamaan perinteisen kvanttifysiikan kurssin jälkeen puutteelliseksi jäänyttä käsitteellisen ymmärryksen tasoa (Euler, Hanselmann, Müller & Zollman 1999). Tutkijat suosittavatkin perinteisten kurssien sisältöjen käsitteellistä reflektiota ja uudelleenorganisointia.

### 2.5.2 Klassinen ja kvanttifysiikan ontologia

Kvanttifysiikka pohjautuu klassiselle perustalle käyttäen klassisia käsitteitä ja representaatiota, joten näiden käsitteiden ymmärtämistä voidaan pitää kvanttifysiikan oppimisen perusedellytyksenä (Steinberg ym. 1999). Mikäli opiskelijan klassisten teorioiden ja käsitteiden hallinnan taso on heikko, on kvanttifysiikan oppiminen kaiketi vaikeaa (Bao & Redish 2002; Vokos ym. 2000). Lukiolaisilla ja yliopisto-opiskelijoilla on havaittu vaikeuksia esimerkiksi klassisen hiukkasen (Müller & Wiesner 2002; Johnston ym. 1998) ja aallon käsitteiden (Vokos ym. 2000; Johnston ym. 1998) ymmärtämisessä. Toisaalta klassisen pohjan vahvistaminen voi lisätä todennäköisyyttä, että opiskelija yrittää soveltaa klassista päättelyä kvanttifysiikan tilanteissa ja konstruoi näin virheellisiä käsityksiä (Bao & Redish 2002; Müller & Wiesner 2002; Fischler & Lichtfeld 1992).

#### A. Klassisen fysiikan perusoliot

Hiukkanen on tiettyjen reaalisten olioiden idealisaatio, joiden prototyyppinä voidaan pitää biljardipalloa ominaisuuksineen. Hiukkasen ominaisuudet voidaan jakaa spatio-temporaalisiin eli paikallis-ajallisiin sekä dynaamisiin ominaisuuksiin. Dynaamiset ominaisuudet liittyvät hiukkasen liikkeeseen vuorovaikutusten vaikutuksesta ja ovat säilyvinä suureina erityisen merkittäviä. (Lévy-Leblond & Balibar 1990)

Aallon käsite idealisoi tiettyjä luonnollisia ilmiöitä ja sen havainnollistamiseksi opetuksessa voidaan viitata esimerkiksi veden pinta-aaltoihin tai äänen etenemiseen ratakiskoissa. Tällöin aallon abstrakti käsite visualisoidaan väliaineessa peräkkäin ja vierekkäin tapahtuvina häiriöinä, jotka ovat veden tapauksessa poikittaisia ja äänen tapauksessa pitkittäisiä. Klassisessa fysiikassa on myös reaalisia kenttiä, joita ei voida

visualisoida häiriöiden tai väliaineessa etenemisen avulla, ja joiden ajatellaan olevan olemassa itsenäisesti, kuten esimerkiksi sähkömagneettinen kenttä tyhjiössä. (Lévy-Leblond & Balibar 1990) Klassisen fysiikan perusolioita ontologisten ominaisuuksiensa kautta kuvataan taulukossa 2.4 (s. 32). Lévy-Leblondin ja Balibarin (1990) mukaan kentän ja aallon käsitteitä käytetään hieman epämääräisesti. Kentän käsitettä käytetään siksi, että se erottaa hiukkasen ja aallon käsitteet toisistaan, ja aallon käsitettä vastaavasti käytetään tilanteissa, joissa tarkastellaan ilmiön etenemistä.

**Taulukko 2.4.** Klassiset perusoliot (Lévy-Leblondia & Balibaria 1990 tulkiten).

Olio	Ontologiset ominaisuudet	
Hiukkanen	Spatio-temporaaliset	Dynaamiset
	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Yksilöityvä (numeroituva)</li> <li>♦ Miehittää tietyn tilan avaruudessa, tietyissä tilanteissa oletetaan pistemäiseksi (massapistetarkastelu)</li> <li>♦ Paikka voidaan määrittää ajan suhteen; rata</li> <li>♦ Tarkka paikka kaikilla ajan hetkillä</li> <li>♦ Massa</li> <li>♦ Sisäiset ominaisuudet, joihin perusvuorovaikutusten kokeminen perustuu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Energia</li> <li>♦ Liikemäärä</li> <li>♦ Pyörimismäärä</li> </ul>
Kenttä	Spatio-temporaaliset	Dynaamiset
	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Jatkuva ja laaja-alainen, miehittää kaikki aika-avaruuden pisteet</li> <li>♦ Lokalisoitumaton</li> <li>♦ Noudattaa lineaarista superpositioperiaatetta</li> <li>♦ Propagoiva, kaikilla aaltorintaman pisteillä on sama arvo <math>\Phi_0</math>. Sähkömagneettisen aallon etenemistä (propagaatiota) kuvaavat Maxwellin yhtälöt.</li> <li>♦ Skalaari tai vektori (tai vielä monimutkaisempi), jonka amplitudi <math>\Phi(\mathbf{r}, t)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Energiatiheys</li> <li>♦ Liikemäärätiheys</li> <li>♦ Pyörimismäärätiheys</li> </ul>

### C. Oppijoiden käsityksiä fotonista ja elektronista

Kvanttifysiikkaan siirryttäessä oppijan on hylättävä klassisen fysiikan perusolioiden, hiukkasen ja aaltoliikkeen konkreetit ja havaintoihin perustuvat mielikuvat ja myös osa näiden mallien ominaisuuksista. Aalto-hiukkasdualismin ymmärtäminen siten, että jokin olio on toisinaan aalto ja toisinaan hiukkanen, tai jokin olio on samanaikaisesti sekä hiukkanen että aalto, ovat ajatuksina absurdeja. Hiukkasen ja aallon käsitteet eivät voi kuvata samaa oliota, vaan kvantti-ilmiöiden ominaisuuksien kautta rakentuvat kvantti-oliot ovat oleellisesti erilaisia klassisen fysiikan perusoloihin verrattuna. (ks. esimerkiksi Lévy-Leblond 2003)

Klassisesta ontologiasta luopuminen on kuitenkin osoittautunut fysiikan opiskelijoille ongelmalliseksi kvanttifysiikkaan siirryttäessä (Mannila ym. 2002; Ireson 2000). Mashhadin ja Woolnoughin (1999) tutkimuksessa huomattava osa lukiolaisista kuvitteli elektronin pieneksi, nopeasti liikkuvaksi pallomaiseksi kappaleeksi. Fotonin lukiolaisten enemmistö kuvasi kirkkaaksi, pallomaiseksi kappaleeksi tai hyvin pieneksi hiukkaseksi. Nämä syvälle juurtuneet mielikuvat rajoittavat tutkijoiden mukaan kvanttitodellisuuden ymmärtämistä.

Olsenin (2002) tulokset lukiolaisten elektroni- ja fotonikäsitysten symmetrisyyttä kartoittavasta tutkimuksesta ovat samansuuntaisia. Suurin osa lukiolaisista mielsi elektronit hiukkasiksi<sup>16</sup> ja enemmistö opiskelijoista ajatteli, että valo on sekä hiukkasia että aaltoja. Suurin osa hiukkasmaisen käsityksen ilmaiseista opiskelijoista mainitsi jonkin elektronin ominaisuuden, kuten massan, liikemäärän tai varauksen. Puolet opiskelijoista, jotka ajattelivat valon olevan hiukkasia esittivät fotonilla olevan massan. Olsenin mukaan massallisuus onkin hiukkasmaisen käsityksen ydin.

Ambrosen ym. (1999) tutkimuksessa suurin osa college-opiskelijoista ilmensi fotonin ja elektronin yhteydessä rata-käsitettä interferenssi-ilmiötä käsittelevässä haastattelussa. Osa opiskelijoista kuvasi haastatteluissa pistemäisten fotonien ja elektronien etenemistä suoraviivaisia raon reunojen lähellä taipuvia ratoja pitkin. Toiset taas kertoivat fotonien ja elektronien liikkuvan sinimuotoisilla radoilla. Lisäksi opiskelijoilla oli vaikeuksia erottaa toisistaan valon aallonpituus ja massallisten kvanttiolioiden, kuten elektronien, de Broglien aallonpituus<sup>17</sup>.

Greca ja Freiren (2003) tutkimukseen osallistuneista yliopiston fysiikan ja insinööriopiskelijoista vain yksi 26 opiskelijasta ymmärsi kvantti-ilmiöt kvanttifysiikan formalismiin nojaavalla tavalla, joka oli tutkijoiden mielestä tavoitelluin käsitys. Loput

---

<sup>16</sup> Olsenin käyttämät elektronia koskevat väitteet olivat: elektronit ovat hiukkasia, elektronit ovat aaltoja, elektronit ovat sekä hiukkasia että aaltoja, elektronit ovat joko hiukkasia tai aaltoja, elektronit eivät ole hiukkasia eikä aaltoja. Valoa koskevat väitteet olivat analogisia.

<sup>17</sup> de Broglien aallonpituus tunnetaan myös aineaallonpituutena. Tätä käsitettä ei kuitenkaan ole suositeltavaa käyttää sen luomien klassisten mielikuvien vuoksi.

ilmaisivat vastauksissaan erilaisia klassisen hiukkasen tai aallon visualisatioiden muunnelmia. Enemmistö opiskelijoista mielsi kvanttioliot massallisiksi, tiettyjä ratoja pitkin eteneviksi materiahiukkasiksi.

Tutkimuksessa, jossa selvitettiin lukiolaisten ja fysiikan opettajaksi opiskelevien käsityksiä klassisista ja kvanttiolioista ilmeni, etteivät monet opiskelijat näe kovin suurta eroa kvanttiolioiden ja klassisten olioiden välillä. Sen sijaan opiskelijat ajattelevat kvanttikäyttäytymisen tulevan vain selvemmin esille olioiden koon pienentyessä (Müller & Wiesner 2000). Tutkijoiden mukaan lukiolaisten ja fysiikan opettajaksi opiskelevien käsitykset eivät poikenneet toisistaan.

#### D. Kvanttioliot

Kvanttiolioille esitettyjä tulkintoja on koottu taulukkoon 2.5 (s. 35). Kvanttikenttäteoriassa (QFT) ja kvanttielektrodynamiikassa (QED) sähkömagneettinen säteily ja materia oletetaan jatkuviksi kentiksi, joiden kvantteja kvanttioliot ovat. Esimerkiksi fotonin on sähkömagneettisen kentän kvantti ja elektroni elektronikentän kvantti.

Bungen tulkinnassa kvanttioliot (*quanta*) ilmentävät joko hiukkasmaisia tai aaltomaisia piirteitä tarkasteltavasta ilmiöstä riippuen. Diracin, Bornin ja Jordanin tulkinnan mukaan kvanttihiukkaset ovat yksilöitymättömiä, hetkellisiä ja paikallisia kvantteja.

Realistisessa tulkinnassa kvanttitilat sen sijaan oletetaan olemassa oleviksi mittauksista riippumattomassa todellisuudessa. Tilat voidaan tulkita kvanttiolioiksi, joiden käyttäytyminen poikkeaa klassisten olioiden käyttäytymisestä. Statistisessa eli ensemble-tulkinnassa kvanttiolioilla ei ole klassisesti tarkkaan määriteltyjä ominaisuuksia, vaan ominaisarvot ominaistiloissa. Lisäksi kvanttimekaniikan ennusteet pätevät vain identtisten olioiden joukoille eli ensembleille.

Kvantti-ilmiöiden ominaisuuksia voidaan opetuksessa tietyissä tilanteissa tulkita aaltomallin tai hiukkasmallin avulla. Etenkin lukiotasolla on hyväksyttävää viitata hiukkasmaisiin (massa, energia, liikemäärä ja pyörimismäärä) ja aaltomaisiin (aallonpituus, taajuus, etenemissuunta) ominaisuuksiin, jotka ilmenevät säteilyn ja materian välisissä vuorovaikutustilanteissa. Oleellista on kuitenkin ymmärtää hiukkas- ja aaltomallin sekä hiukkasmaisten ja aaltomaisten ominaisuuksien ontologinen luonne. Sekä hiukkanen että aalto ovat viime kädessä komplementaarisia malleja, jotka kuvaavat ilmiöiden käyttäytymistä. Kumpikaan näistä malleista ei ole yksinään riittävä kaikkien säteilyn ja materian välisten vuorovaikutustapahtumien selittämiseen.

**Taulukko 2.5.** Näkemyksiä kvanttiolioista.

<p><b>Kvanttikenttäteoria QFT ja kvanttielektrodynamikka QED</b> (Hobson 2005, Bunge 2003)</p> <p>Sähkömagneettinen säteily ja materia ovat jatkuvia kenttiä, joiden kvantteja fotonit ja materiahiukkaset ovat. Esimerkiksi fotoni on sähkömagneettisen kentän kvantti ja elektroni elektronikentän kvantti.</p>
<p><b>Bungen tulkinta</b> (Bunge 2003, Lévy-Leblond &amp; Balibar 1990)</p> <p>Kvanttioliot (<i>quantons</i>) ilmentävät joko hiukasmaisia tai aaltomaisia ominaisuuksia riippuen ilmiöstä.</p> <p>Kvanttioliot ovat kenttien tapaan laaja-alaisia ja hiukkasten tapaan diskreettejä.</p>
<p><b>Diracin, Bornin ja Jordanin tulkinta</b> (Hobson 2005)</p> <p>Hiukkaset ovat yksilöitymättömiä, hetkellisiä ja paikallisia kvantteja.</p> <p>Aaltofunktio sisältää kaiken tiedon kvanttitilasta.</p>
<p><b>Realistinen tulkinta</b> (Greca &amp; Freire 2003)</p> <p>Kvanttitilat ovat olemassa mittauksista riippumattomassa fysikaalisessa todellisuudessa. Tilat voidaan tulkita kvanttiolioiksi, joiden käyttäytyminen poikkeaa makroskooppisten kappaleiden käyttäytymisestä.</p> <p>Muutokset ovat mahdollisia vain tilojen välillä.</p>
<p><b>Statistinen / emsemble tulkinta</b> (Müller &amp; Wiesner 2002)</p> <p>Kvanttiolioilla ei ole klassisesti tarkkaan määriteltyjä ominaisuuksia, kuten paikkaa, liikemäärää ja energiaa. Esimerkiksi jos elektroni ei ole liikemäärän ominaistilassa, ei sillä ole liikemäärän ominaisarvoa. Samoin elektronilla atomiorbitaalilla ei ole paikan ominaisuutta.</p> <p>Kvanttimekaniikan ennusteet pätevät vain identtisten olioiden ensembleille eli joukoille.</p>

## 2.6 Kvanttifysiikan opetuskokeiluja

Kvanttifysiikan opetus yliopistotasolla ei ole juuri muuttunut kvanttimekaniikan synnyn jälkeen (Johnston ym. 1998). Perinteisesti kvanttimekaniikkaa opetetaan soveltaen opetuksen lähestymistapaa, jota voidaan kutsua kvantitatiiviseksi tai matemaattiseksi. Opiskelijat tutustuvat matemaattisiin algoritmeihin ja proseduureihin sekä käyttävät niitä kvanttimekaniikan ongelmien ratkaisemiseen. Sivutuotteena opiskelijoiden oletetaan omaksuvan myös kvanttimekaniikan käsitteistön. (Cataloglu & Robinett 2002; Bao & Redish 2002) Tutkimukset kuitenkin osoittavat, että oppijoiden käsitteellisen ymmärryksen taso on valitettavan usein perinteisen opetuksen jälkeen jäänyt vaatimattomaksi (Euler ym. 1999) ja oppijoilla ilmenee tieteellisen näkemyksen vastaisia käsityksiä (Müller & Wiesner 2002). Lisäksi on havaittu, etteivät opiskelivat käsitteet integroidu opiskelijoiden aiempiin tietorakenteisiin, suurin osa opiskelijoista tuo esille aiempia lukiotason käsityksiään myös opetuksen jälkeen ja heidän kykynsä käyttää malleja on heikko (Fletcher & Johnston 1999).

Suomessa tilanne ei periaatteessa ole lukiotasolla yhtä huolestuttava, sillä kvanttifysiikan opetus lukiotasolla keskittyy edellä mainittujen kvanttifysiikan syntyyn johtaneiden ilmiöiden tarkasteluun ollen pääosin kvalitatiivista (Opetussuunnitelma 2003). Yliopisto-opetuksessa kvantti-ilmiöt sen sijaan perinteisesti usein sivuutetaan melko nopeasti pääpainon ollessa juuri kvanttimekaniikan formalismin tarkastelussa. Voidaan olettaa, että suomalaisilla yliopisto-opiskelijoilla esiintyy samankaltaisia oppimisen ongelmia kuin vähälukuisissa kansainvälisissä tutkimuksissa on ilmennyt. Lisäksi ajateltaessa fysiikan opettajaopiskelijoita, lukiossa opetettavan kvanttifysiikan ja yliopistokvanttifysiikan tiedon välille jää selvä aukko.

Kvanttifysiikan oppimisen ongelmien ratkaisemiseksi toteutettuja opetuskokeiluja on raportoitu vain muutamia. Näitä opetuskokeiluja painopistealueineen ja tuloksineen esitellään seuraavaksi.



## 2.6.1 Kvanttifysiikkaa ilman analogioita

Fischler ja Lichtfeldt (1992) ovat kehittäneet modernin fysiikan kurssin lukiotasolle. Kurssin perusajatuksena on, ettei opetuksessa käytetä klassisia analogioita, ja se pohjautuu seuraaville lähtökohdille:

- ♦ vältetään klassiseen fysiikkaan viittaamista
- ♦ opetus aloitetaan elektroneilla, ei fotoneilla
- ♦ tarkasteltavien ilmiöiden tulkinnassa käytetään tilastollista tulkintaa dualistisen tulkinnan asemesta
- ♦ Heisenbergin epätarkkuusperiaate esitellään jo opetuksen varhaisessa vaiheessa, formuloituna kvanttiobjektien ensembleille eli joukoille
- ♦ vetyatomin yhteydessä ei käytetä Bohrin atomimallia

Fischlerin ja Lichtfeldtin (1992) mukaan näiden seikkojen huomioiminen opetuksessa estää opiskelijoita yrittämästä ymmärtää kvanttifysiikan ilmiöitä klassisten käsitysten avulla. Heidän mukaansa diffraktio- tai interferenssikuvion muodostumisen tulkinta tilastollisesti jakautuneiksi itsenäisiksi prosesseiksi auttaa oppijoita luopumaan ei-toivotusta dualistisesta käsityksestä. Opetuksessa lähdetään liikkeelle havainnoista ja keskustellaan opiskelijoille aalto-optiikasta tutuista kuvioista. Tavoitteena on kyseenalaistaa opiskelijoiden aiemmat ajatukset ja käsitykset kvanttiolioiden erikoisen käyttäytymisen korostamiseksi kognitiivisen konfliktin menetelmää soveltaen. Tähän tarkoitukseen elektronit ovat Fischlerin ja Lichtfeldtin mukaan paljon sopivampia kuin fotonit, koska tutkijoiden hypoteesin mukaan opiskelijat herkemmin assosioivat fotonin klassiseen hiukkaseen kuin kuvittelevat elektronin eräänlaiseksi ainealloksi.

Kehitettyä kurssia testattiin useissa eri lukioissa ja tutkimusaineistoa kerättiin kyselyjen, haastattelujen ja opetuksen videoinnin avulla. Kyselyt koostuivat avoimista kysymyksistä, sana-assosiaatioista ja piirtämistehtävistä, ja ne keskittyivät valoon, elektronin sijaintiin atomissa, hiukkasen käsitteeseen sekä tieteenfilosofian kysymyksiin. Kaikkien kurssien opiskelijat ( $n = 150$ ) vastasivat kyselyyn kurssin alussa, ja kahden kurssin opiskelijoita haastateltiin. Kuuden kurssin opetus videoitiin oppilaiden käsitysten johdonmukaisuuden ja aitouden kartoittamiseksi. Kaikki tutkimukseen osallistuneet opiskelijat vastasivat toiseen kyselyyn viiden viikon kuluttua kurssin päättymisestä ja kolmen kurssin opiskelijoita haastateltiin. Vertailun vuoksi suuri joukko perinteisen modernin fysiikan kurssin suorittaneita lukiolaisia ( $n = 120$ ) vastasi alku- ja loppukyselyihin. (Fischler & Lichtfeldt 1992).

Fischlerin ja Lichtfeldtin mukaan käsitteellisen muutoksen laatua tarkasteltaessa kokeilukurssi oli onnistuneempi perinteiseen opetustapaan verrattuna. Perinteisessä opetuksessa opiskelijoiden enemmistön käsitykset eivät muuttuneet lainkaan, ja vain

harvat saavuttivat tutkijoiden luokittelussa tyydyttävän käsitteellisen muutoksen. Kokeilukurssilla sen sijaan noin puolet opiskelijoista saavutti tyydyttävän käsitteellisen muutoksen ja viidesosa täydellisen käsitteellisen ymmärryksen käytetyillä mittareilla mitattuna. On kuitenkin huomattava, että tässä tutkijat tarkoittavat käsitteellisellä muutoksella oppimisen lopputulosta, ei oppimisen prosesseja.

### 2.6.2 Kvanttifysiikan luonnetta korostava kurssi

Müller ja Wiesner (2002) ovat suunnitelleet ja toteuttaneet lukiolaisille tarkoitettun Fischlerin ja Lichtfeldin suosituksille perustuvan kvanttifysiikan kurssin. Kurssilla käsiteltyjä aiheita olivat muun muassa valosähköinen ilmiö, aalto- ja hiukkaskäyttäytyminen, elektronien diffraktio sekä kaksoisrakokoe.

Kurssilla haluttiin tehdä selväksi, miten kvantti-ilmiöt poikkeavat klassisesta arkikokemuksesta. Tähän päämäärään pyrittiin valitsemalla kurssin kantavat ajatukset siten, että ne eroavat radikaalisti klassisesta fysiikasta. Kurssin perusajatukset olivat seuraavat:

- ♦ Bornin todennäköisyystulkinnan syvälinen ymmärtäminen mahdollistaa aaltohiukkasdualismin paremman ymmärtämisen. Todennäköisyystulkinta esitellään heti kurssin alussa ja sitä hyödynnetään kurssin aikana.
- ♦ kvanttiolioilla ei ole klassisesti tarkkaan määriteltyjä ominaisuuksia, kuten paikkaa, liikemäärää tai energiaa. Jos elektroni ei ole liikemäärän ominaistilassa, sillä ei ole liikemäärän ominaisuutta. Samoin elektronilla atomiorbitaalilla ei ole paikan ominaisuutta.
- ♦ mittaaminen ei ole olemassa olevien arvojen passiivista ”lukemista” vaan aktiivinen prosessi. Ominaisuuden olemassaolo ja sen mittaaminen eivät tarkoita samaa asiaa.

Kurssilla käytettiin ensemble-tulkintaa<sup>18</sup>, joka Müllerin ja Wiesnerin (2002) mukaan tarjoaa selkeän ja ymmärrettävän tavan kvantti-ilmiöiden käsittelyyn. Kurssin ensimmäinen osa oli kvalitatiivinen ja se oli suunnattu niille lukiolaisille, jotka eivät opiskele fysiikkaa. Kurssin toinen osa sen sijaan oli suunnattu jatkokurssiksi fysiikkaan suuntautuville lukiolaisille, ja sillä perehdyttiin kvanttifysiikan formalismiin.

Kurssin arvioimiseksi opiskelijat vastasivat kurssin päätyttyä laajaan kvanttifysiikan ymmärtämistä käsittelevään monivalintakyselyyn, jonka ensimmäisessä osassa tuli arvioida annettujen väittämien oikeellisuutta likert-asteikolla<sup>19</sup> toisen osan

---

<sup>18</sup> Müllerin ja Wiesnerin käyttämää ensemble-tulkintaa esiteltiin luvussa 2.5.2.

<sup>19</sup> Likert-asteikko on asenneväittämäasteikko, jossa vastaajat arvioivat esitettyjä väittämiä viisiosaisella asteikolla, joka on yleensä muotoa ”täysin samaa mieltä”, ”samaa mieltä”, ”ei samaa enkä eri mieltä”, ”eri mieltä”, ”vahvasti eri mieltä”.

koostuessa avoimista kysymyksistä. Noin kolmasosa opiskelijoista myös haastateltiin. Opiskelijoiden käsitykset pisteytettiin monivalintojen oikeellisuuden mukaan. Asteikko määriteltiin siten, että +100 tarkoitti täysin opetuksen tavoitteiden mukaisia ja -100 vahvasti opetuksen vastaisia käsityksiä. Kokeilukurssin opiskelijoiden pisteiden keskiarvoksi tuli +55.8 keskihajonnan ollessa 19.5, kun vertailuryhmänä käytetyn ensimmäisen vuoden fysiikanopiskelijaryhmän pisteiden keskiarvo oli +35.2 keskihajonnalla 23.7. Tutkijoiden mukaan suurin osa kokeilukurssin opiskelijoista omaksui kvanttimekaniikan käsitteistön opetuksen tavoitteiden mukaisesti, eikä perinteisen opetuksen jälkeen tyypillisiä virheellisiä käsityksiä esiintynyt. (Müller & Wiesner 2002)

Huomionarvoista on, että myös Müller ja Wiesner pitävät oppimisen lopputulosta oppimisen mittana. Lisäksi luokkamuuttajien pisteyttäminen ja niiden keskiarvojen laskeminen sotii tilastotieteen peruseräiteitä vastaan.

### 2.6.3 Teknologiaapainotteista kvanttimekaniikkaa

Zollman, Rebello & Hogg (2002) ovat kyseenalaistaneet käsityksen, jonka mukaan kvanttifysiikan ymmärtämiseksi on opiskeltava suuri määrä klassisen fysiikan kursseja. Tavoitteena on ollut opettaa kvanttimekaniikkaa kohderyhmille, jotka eivät sitä tavallisesti opiskele, sekä parantaa matemaattisella lähestymistavalla kvanttifysiikkaa opiskelleiden opiskelijoiden kvanttifysiikan ymmärtämistä. Tuotetun oppimateriaalin avulla kvanttifysiikan aiheita voidaan integroida jo ensimmäisiin fysiikan kursseihin. Fysiikan oppimistutkimusten tuloksille nojaava materiaali sisältää käytännön harjoituksia ja interaktiivisia tietokonevisualisatioita, ja sitä on käytetty lukiotasolta aina yliopistotasolle saakka sekä myös opettajien täydennyskoulutuksessa. Kurssilla pyritään kvanttifysiikan käsitteelliseen ymmärrykseen tarkastelemalla opiskelijoille tuttuja laitteita, kuten LED ja valokennot, joiden toiminta voidaan ymmärtää kvalitatiivisesti ja selittää vain kvanttifysiikan avulla.

Lukio- ja collegetason opetuksen lähestymistapa rakentuu tehtävälomakkeille, joiden avulla pyritään ohjaamaan opiskelijoiden oppimisprosesseja. Materiaali on kuitenkin suunniteltu siten, että opettaja on tärkeässä asemassa. Opettaja auttaa oppijoita ymmärtämään, ohjaa oppimista kysymyksillä ja tarvittaessa selittää ongelmallisia seikkoja. Fysiikan yliopisto-opiskelijoille suunnattu kurssimateriaali pohjautuu lukiotason materiaalille, mutta siinä materiaali muodostaa ajallisesti pienempiä kokonaisuuksia ja on tarkoitettu käytettäväksi pienryhmäharjoituksissa.

Materiaalin tavoitteena on, että opiskelijat pystyvät tekemään havaintoja ja rakentamaan niiden pohjalta kvanttiperiaatteiden mukaiset mentaalimallit. Tavoitteena on myös, että opiskelijat pystyvät selittämään havaintonsa ja soveltamaan omaksumiaan

malleja myös muissa tilanteissa. Kurssien opetuksessa ei käytetty Fischlerin ym. (1992) suosituksen mukaisesti Bohrin atomimallia, vaan atomin energiatasomallia.

Tulosten mukaan materiaali on ollut tehokasta kvanttimekaniikan abstraktien käsitteiden opetuksessa ei-fysiikkaan suuntautuneille lukiolaisille sekä fysiikan ja insinööriopiskelijoille (Rebello & Zollman 1999; Zollman ym. 2002).

#### 2.6.4 Fenomenologis-käsitteellinen kvanttimekaniikan kurssi

Greca ja Freiren (2003) kvanttimekaniikan opetuksen lähestymistapa nojaa kvanttimekaniikan realistiseen tulkintaan<sup>20</sup>. Aalto- ja hiukkasmallien sijaan opetuksessa korostettiin ajatusta kvanttisysteemeistä kvanttioliona (*quantum objects*), joiden käyttäytyminen poikkeaa makroskooppisten olioiden käyttäytymisestä.

Yliopiston insinööriopiskelijoille suunnatun opetuskokonaisuuden keskeisiä käsitteitä ovat tilan superpositio, epätarkkuusperiaate, aaltohiukkasdualismi, todennäköisyysjakauma ja epälokaalisuus. Opetuksessa tarkastellaan niitä kokeita ja havaintoja, joissa kvanttimekaniikan peruseriaatteet ilmenevät välttämättä kuitenkin käyttämällä klassisia käsitteitä ja malleja. Periaatteet pyritään tekemään ymmärrettäviksi siten, että ne eivät näyttäytyä fysikaalisesta maailmasta irrallisina matemaattisina relaatioina. Näin opiskelijoita voidaan auttaa visualisoimaan kvanttimaailmaa ja rakentamaan sen kuvaamiseen tarvittavat mentaalimallit. (Greca & Freire 2003)

Kurssin pienryhmäharjoitukset sisältävät käsitteellisiä kysymyksiä ja lyhyitä ongelmatehtäviä, jotka muodostavat osan kurssilla käsiteltävästä teoriasta. Greca ja Freiren (2003) mukaan pienryhmäkeskustelut ja keskustelut opettajan kanssa ovat hyvin merkittävässä asemassa. Opiskelijoita kannustetaan ilmaisemaan käsityksiään tarkasteltavista ilmiöistä tuoden myös esille ristiriitaisuudet ja ymmärtämisen vaikeudet, jolloin opiskelijat pystyvät tarkastelemaan ja parantamaan ilmiöihin liittyviä mentaalimallejaan. Greca ja Freiren (2003) mukaan oppijan mentaalimallien perusta määrää sen, miten hän ymmärtää eri käsitteet ja ilmiöt, ja ymmärtääkö hän ne samankaltaisina. Täten tieto siitä, miten opiskelijat assosioivat tietyt käsitteet voi antaa viitteitä näiden käsitteiden ymmärtämiseksi tarvittavista mentaalimalleista.

Mentaalimallien kartoittamiseksi tutkijat käyttivät esi- ja lopputestissä kurssin keskeisiin käsitteisiin kohdistuvia sana-assosiaatioita ja käsitteellisiä ongelmatehtäviä. Lopputestissä opiskelijat selittivät käsitteitä myös omin sanoin. Tulosten mukaan 40% kokeiluryhmän opiskelijoista kehitti kurssilla orastavan kvanttiolioperustan ja neljäsosa kvanttiolioperustan; 65% opiskelijoista siis saavutti kelvollisen ymmärryksen. Kvanttiolioperustan omaksuneet opiskelijat olivat Greca ja Freiren (2003) mukaan omaksuneet kurssin keskeiset käsitteet. Orastavan kvanttiolioperustan kategoriaan

---

<sup>20</sup> Greca ja Freiren realistinen tulkinta esiteltiin luvussa 2.5.2.

kuuluvat opiskelijat puolestaan hallitsivat epätarkkuusperiaatteen ja todennäköisyyden käsitteen, mutta eivät pystyneet selittämään tilojen superpositioita. Vertailuryhmänä käytetyn perinteisen kvanttifysiikan kurssin opiskelijat sen sijaan kuuluvat pääosin muutamia kvanttiominaisuuksia sisältävän klassisen perustan ja määrittelemättömän perustan kategorioihin.

On kuitenkin syytä huomata, että Greca ja Freire (2003) tutkimuksessa suuri osa (18%) opiskelijoista omaksui klassisen ontologiaan nojaavan perustan, tai opiskelijoiden käsitteiden hallintaa ei voitu luokitella (17%). Huolimatta siitä, että tutkimuksessa opiskelijat osallistuivat sekä alku- että lopputestiin, oppimisen mittana käytetään oppimisen lopputulosta. Vaikuttaakin siltä, että tutkijat näkevät oppijoiden mentaalimallit varsin staattisina mielen rakenteina.

## 2.7 Aiempien tutkimusten kokoava tarkastelu

Monet opiskelijoiden kvanttioloiden ja -ilmiöiden käsityksiä kartoittavat tutkimukset on toteutettu lukiotasolla (Olsen 2002; Mashhadi & Woolnough 1999; Ireson 1999) pääasiallisen tutkimusmenetelmän ollessa monivalintakysely, jota on mahdollisesti täydennetty avoimilla kysymyksillä. Vaikuttaa siltä, että tutkimuksissa on aidon opiskelijoiden käsitysten kartoittamisen sijaan lähdetty verifioimaan tutkijoiden omille käsityksille nojaavia hypoteeseja. Tutkijoiden omat käsitykset vaikeuttavat myös tutkimustulosten keskinäistä vertailua. (Asikainen ym. 2006a) Esimerkiksi Olsen (2002) tulkitsee aalto-hiukkasdualismia naiivin tulkinnan mukaan eli ymmärtää sen tarkoittavan, että olio on sekä hiukkanen että aalto. Fysikaalisesti oikeellisin vaihtoehto elektronin ja valon ontologiasta, eivät ole hiukkasia eivätkä aaltoja, esiintyi myös Olsenin kyselyssä, mutta tulkittiin virheelliseksi vaihtoehdoksi.

Monissa tutkimuksissa aineisto on kerätty monivalintakyselyllä, jonka laadinnassa tulisi noudattaa erityistä huolellisuutta. Hyvin laaditussa kyselyssä kaikki vastausvaihtoehdot vaikuttavat oppijasta potentiaalisilta, ja oikean vastauksen valitsemiseksi on ymmärrettävä asia syvällisesti. Likert-asteikollisen monivalintakyselyn esi- ja jälkitestien tulosten tilastollisen analyysin perusteella johtopäätösten tekeminen oppijoiden kvantti-ilmiöiden ymmärtämisestä (Ireson 1999; myös Müller & Wiesner 2002) on melkoisen rohkeaa, koska pelkillä kyselyillä saatu tieto on tunnetusti pinnallista ja sirpalemaista, jo saatavan tiedon ontogian näkökulmasta (ks. esimerkiksi Kvale 1996 tai Tuomi & Sarajärvi 2004). Luonnollisesti kyse voi olla myös siitä, mitä ymmärtämisellä ymmärretään.

Vertailuryhmien käyttö oppimistutkimuksissa on hieman arveluttavaa (Fischler & Lichtfeldt 1992; Müller & Wiesner 2002; Greca & Freire 2003). Ei liene yllättävää, että uuden lähestymistavan ymmärtämistä mittaavan testin tulokset ovat paremmat

kokeiluryhmässä kuin perinteiseen opetukseen osallistuvassa ryhmässä. Muutoinkin oppimisen arviointi pelkän alku- ja lopputuloksen perusteella ei anna todellista tietoa oppimisprosesseista, ymmärtämisen ongelmista ja opetuksen kriittisistä kohdista.

Müllerin ja Wiesnerin (2002) tutkimuksessa, jossa kartoitettiin lukiolaisten ja fysiikan opettajaksi opiskelevien käsityksiä klassisille ja kvanttiolioille tyypillisistä ominaisuuksista, lukiolaisten ja fysiikan opettajaopiskelijoiden käsitykset eivät poikenneet toisistaan. Olisi kuitenkin melko uskaliaasta olettaa, että lukiolaisilla esiintyvät käsitykset ovat yleistettäviä yliopistotasolla maailmanlaajuisesti. Eri maissa toteutettujen tutkimusten tulosten vertailtavuus on myös epävarmaa ilman opetussuunnitelmia koskevia taustatietoja. Lisäksi eri tavoin painottuneet opetuksen lähestymistavat, kuten formalismiin nojaava tai empiiris-historiallinen lähestymistapa vaikuttanevat eri lailla oppilaiden käsitysten muodostumisprosessiin.

Mashhadin ja Woolnoughin (1999) tutkimuksessa lukiolaisten elektronin ja fotonin mielikuva osoittautui yleisimmin hiukkasmaiseksi. Tutkimusraportista ei käy kuitenkaan ilmi, kysyttiinkö opiskelijoilta visualisointitavan ja reaalimaailman välistä suhdetta eli ymmärsivätkö he visualisointien malliluonteen. Kriittisesti voidaan myös esittää, että on merkityksetöntä tutkia oppijoiden mielikuvia fotonista ja elektronista, sillä yksilöllä ei voi olla mielikuvaa sellaisesta, mitä ei voida havaita; mielikuva on tuolloin *mallin* mielikuva, ei itse olion (Saariluoma 1990). Tässä tapauksessa siis pitäisi puhua elektronimallin ja fotonimallin mielikuvista, ei elektronin ja fotonin mielikuvista.

Kvanttifysiikan oppimisen tutkijat ovat pyrkineet kuvaamaan oppimista opiskelijan mentaalimallien avulla (Greca & Freire 2003; Rebello & Zollman 1999). Kuten aiemmin luvussa 2.3.3 todettiin, mentaalimallin käsite on monimerkityksellisyydessään ongelmallinen erityisesti fysiikan oppimisen tutkimuksessa. Vaikuttaa siltä, että kvanttifysiikan oppimistutkijoiden näkemyksen mukaan oppijan mentaalimallit ovat varsin staattisilta ja niistä saatava tieto positivistista ja objektivistista.

Konstruktivistisen paradigman näkökulmasta oppijan ajattelusta tai mentaalimalleista saatava tieto on epistemologialtaan subjektivistinen ja konstruoituu kyselijän ja tietäjän välisessä vuorovaikutuksessa (Guba & Lincoln 1994). Oppijan ilmaistessa mentaalimalliaan malli muuttuu, jolloin sitä kutsutaan ilmaisumalliksi (Gilbert ym. 2000) Tällöin oppijan vastausten voidaan olettaa vain kuvastavan hänen mentaalimallejaan (ks. esimerkiksi Vuorinen ym. 1995). Matematiikan oppimisen tutkijat Tall ja Vinner (1981) eivät puhu oppijan mentaalimalleista, vaan oppijan käsitekuvasta. Käsitekuvalla he tarkoittavat tiettyyn käsitteeseen liittyviä kognitiivisia rakenteita, johon sisältyvät myös käsitteeseen liittyvät mielikuvat, ominaisuudet ja prosessit. Eri aikoina käsitekuvasta palautuu mieleen erilaisia osia.

Harvoissa kvanttifysiikan opetuskokeiluissa on kiinnitetty huomiota oppimisprosesseihin. Sen sijaan oppijoiden malleja tai käsityksiä on tarkasteltu

staattisesti ennen opetusta ja opetuksen jälkeen, jolloin prosessinäkökulma on jäänyt pois. Ainoa tunnettu oppimisprosessitutkimuksen piirteitä toteutuksessaan sisältävä kvanttifysiikan oppimiseen liittyvä tutkimus on esitelty Fischlerin ja Lichtfeldtin (1992) tutkimus. Tutkimusta esittelevä artikkeli ei kuitenkaan sisällä oppimisprosessien kuvauksia, vaan siinä keskitytään kuvaamaan käsitteellistä muutosta alku- ja lopputestien tulosten näkökulmasta. Lisäksi atomifysiikan oppimisprosesseja on tutkittu (Petri & Niedderer 1998), mutta aihe ei varsinaisesti kuulu tämän työn aihepiiriin.

Kokonaisuutena kvanttifysiikan oppimista ja opettamista tarkastelevien aiempien tutkimusten pohjalta oppijan ajattelusta muodostuva kuva jää varsin staattiseksi. Tämä ei tue nykyaikaista näkemystä oppimisprosesseista, jonka mukaan oppijoiden mallit tulisi ymmärtää dynaamisiksi ja alati muuttuviksi rakenteiksi. Vasta näiden muutosprosessien tutkimus tuottaa sellaista tietoa, jonka avulla opetuksen kriittiset kohdat voidaan tunnistaa ja tehokkaasti huomioida opetuksessa. (Asikainen, Hirvonen & Koponen 2005a)

## Luku III

### Tutkimuksen toteutus

Tässä luvussa esitetään tutkimustehtävä ja -kysymykset ja tuodaan esille tutkimuksen paradigma, joka toimii koko tutkimusprosessia ohjaavana tekijänä. Tutkimusstrategiana toimivan tapaustutkimuksen kuvailun jälkeen tarkastellaan tutkimusprosessia, tutkimukseen osallistujia sekä aineistonkeruu- ja analysointimenetelmiä. Lopuksi käsitellään laadullisen tutkimuksen luotettavuuden arviointia.

#### 3.1 Tutkimustehtävä ja -kysymykset

Käsillä olevan tutkimuksen tutkimustehtävänä on tutkia fysiikan opettajaopiskelijoiden ja työssä olevien aineenopettajien kvantti-ilmiöiden ja -olioiden ymmärtämistä opettajille suunnatulla modernin fysiikan kurssilla. Molempien, sekä ilmiöiden että olioiden ymmärtämisen tutkiminen on tarpeen, koska oppijoiden kvanttiolioiden käsitysten tulisi rakentua kvantti-ilmiöiden kautta, kuten se rakentuu myös fysiikan teoriassa. Oppijoiden tulkintoja selvittämällä puolestaan saadaan arvokasta tietoa siitä, miten he ovat ymmärtäneet opetetut asiat.

Tarkastelun kohteena ovat opiskelijoiden ja opettajien kvanttifysiikan ilmiöille ja oliolle kurssin eri vaiheissa esittämät selitysmallit. Tässä tutkimuksessa oppijan mallilla tarkoitetaan oppijan ilmaisemaa selitystä kartoitettavalle ilmiölle tai oliolle. Malli voi muodostua useista tarkasteltavaan olioon tai ilmiöön liittyvästä käsitteistä, jotka muodostavat verkkomaisen rakenteen, *käsiteverkon* (Eysenck & Keane 2005). Oppijan mallilla on siten yhtäläisyyttä Tallin ja Vinnerin (1981) käsitekuvan kanssa. Heidän mukaansa käsitekuvan kehittyessä se ei välttämättä ole koherentti. Tall ja Vinner (1981) kutsuvat tiettyä ajanhetkenä aktivoituvaa käsitekuvan osaa mieleen palautuvaksi käsitekuvaksi<sup>21</sup>. Eri tilanteissa käsitekuvasta palautuu mieleen erilaisia osia. Toistensa kanssa ristiriitaisten käsitekuvan osien palautuessa oppijan mieleen samanaikaisesti kokee oppija hämmennystä.

On syytä huomauttaa, että oppijan mallilla ei tässä työssä tarkoiteta mentaalimallia, joka on fysiikan oppimistutkimuksen parissa monimerkityksinen käsite

---

<sup>21</sup> Engl. evoked concept image



(Gutierrez 2002). Näkemykseni mukaan oppijan malleista vuorovaikutteisten tutkimusmenetelmien kautta saatava tieto ei suoraan vastaa hänen sisäisiä mallejaan. Mallin esittäminen muuttaa mallia, ja tällöin konstruoituva malli on niin sanottu ilmaisumalli (Gilbert ym. 2000). Oppijan vastausten siis voidaan ajatella *kuvastavan* hänen mallejaan (ks. esimerkiksi Vuorinen ym. 1995). Mentaalimallien voidaan myös ajatella konstruoituvan tilanteessa, jota oppija pyrkii ymmärtämään (Vosniadou 2002).

Tarkasteltava tutkimus on tapaustutkimus, jossa kurssi molempine toteutuskertoineen muodostaa erilliset tapaukset. Ensimmäisen kurssin osallistujat olivat fysiikan opettajaopiskelijoita toisen kurssin osallistujien ollessa työssä olevia aineenopettajia. Suurin osa opettajaopiskelijoista opiskeli fysiikkaa pääaineenaan. Aineenopettajista enemmistö oli opiskellut fysiikkaa sivuaineenaan kahta pääaineopiskelijaa lukuun ottamatta.

Opiskelijoista ja opettajista valitut tapaustutkimusoppijat toimivat myös itsenäisinä tapauksina. Esi- ja lopputestien kautta muodostuu kuva opetusryhmien osaamisesta, johon yksityiskohtaisemmin tutkittujen oppijoiden osaamista verrataan.

Tutkimustehtävään vastaamiseksi tutkimuksen avulla etsitään vastauksia seuraavaan kolmeen tutkimuskysymykseen:

- 1. Miten oppijat käyttävät malleja selittäessään mustan kappaleen säteilyä, valosähköistä ilmiötä ja Comptonin ilmiötä?*
- 2. Mitä malleja ja ominaisuuksia oppijat liittävät elektroniin ja fotonin?*
- 3. Miten oppijat suhtautuvat kurssiin ja käytettyihin opetusmenetelmiin?*

Tutkimuskysymyksellä 1 selvitetään, miten oppijat käyttävät malleja selittäessään tarkastelun kohteena olevia kvantti-ilmiöitä. Karkeasti luokitellen oppijoiden selitysmallit voivat olla klassisia tai kvanttimalleja sekä niiden piirteiden yhdistelmiä eli hybridimalleja. Koska kyseessä ovat kvanttifysiikan ilmiöt, olisi kuitenkin asianmukaista käyttää kvanttimalleja. On kiinnostavaa tietää, millaisia malleja oppijat käyttävät mustan kappaleen säteilyn sekä valosähköisen ja Comptonin ilmiöiden yhteydessä, koska kokeilukurssin aihepiiriin liittyvien kvantti-ilmiöiden ymmärtämistä ei tietävästi ole tutkittu valosähköistä ilmiötä lukuun ottamatta (Steinberg, Oberem & McDermott 1996). Mielenkiintoista on myös selvittää, muuttuvatko oppijoiden mallit kurssin aikana kurssin opetuksen tavoitteiden mukaisiksi, ja etsiä mahdollisia selityksiä oppijoilla mahdollisesti esiintyviin ymmärtämisen ongelmiin.

Tutkimuskysymyksellä 2 haetaan vastausta siihen, mitä malleja ja ominaisuuksia oppijat käyttävät elektronin ja fotonin kuvailuun kurssin aikana. Käsitys olioista rakentuu niihin liittyvien mallien ja ominaisuuksien kautta, joten näin voidaan

muodostaa kuva siitä, millaisina oppijat näkevät elektronin ja fotonin. Tutkimuksissa on havaittu, että lukiolaisten elektronin ja fotonin käsitykset ovat perustaltaan klassisia (Mashhadi & Woolnough 1999; Olsen 2002; Ambrose ym. 1999). Oletettavaa on, että opettajaopiskelijoiden ja aineenopettajien näkemykset näistä kvanttiolioista ovat sofistikoituneempia ja monitahoisempia.

Tutkimuskysymyksellä 3 haetaan tietoa siitä, miten oppijat suhtautuvat kurssiin ja kurssilla käytettyihin opetusmenetelmiin. Kurssin oppijan aktiivista roolia korostavat opetusmenetelmät poikkeavat selkeästi Joensuun fysiikan laitoksen tavanomaisista menetelmistä. Lisäksi kurssin toinen toteutus (opetusryhmä II, opettajat) muodostui etäopiskelusta ja lähiopetusjaksoista.

Tutkimuskysymyksistä suurimman painoarvon tässä työssä saavat kaksi ensimmäistä kysymystä kolmannen jäädessä painoarvoltaan pienemmäksi.

### 3.2 Tutkimuksen paradigma

Mitä paradigman käsite tarkoittaa, ja mikä on sen merkitys tutkimukselle? Paradigman käsitteen määrittely vaikuttaa ongelmalliselta, ja yksiselitteistä määritelmää on vaikea löytää tutkimuskirjallisuudesta. Kansanen (2000) kutsuu paradigmaa tieteenfilosofiseksi lähestymistavaksi; Guba ja Lincoln (1994) puolestaan määrittelevät paradigman filosofiseksi käsitykseksi, jotka sen kannattajat allekirjoittavat. Moilanen (2000) kritisoi tämän kaltaista käsitteenmäärittelyä, koska siinä filosofiset sitoumukset liittyvät vain tutkijan uskomuksiin, ja paradigman käytännöllinen puoli, onnistuneet ongelmanratkaisut ja toteutetut tutkimukset, unohdetaan täysin. Moilasan (2000) mukaan ”tutkimuksen tekemisen filosofiset sitoumukset ovat niitä ontologisia, epistemologisia ja eettisiä kannanottoja, jotka ovat sopusoinnussa menetelmällisten ratkaisujen kanssa”, joiden avulla tutkija voi perustella tekemänsä menetelmälliset ratkaisut.

Tutkijan paradigman selvittäminen on tärkeää, koska se ohjaa joko eksplisiittisesti tai implisiittisesti koko tutkimusprosessia lähtien tutkimusmetodologian valinnasta tulosten luotettavuuden tarkasteluun saakka. Koska tässä tutkimuksessa tutkimuksen kohteena ovat oppijoiden käsitykset, eikä esimerkiksi tutkita tiettyä fysiikan ilmiötä, on tutkimuksen paradigma konstruktivistinen. Konstruktivistisen ja luonnontieteelliselle tutkimukselle tyypillisen positivistisen paradigman piirteitä vertaillaan taulukossa 3.1 (s. 47). Ontologialla tarkoitetaan todellisuuden luonteeseen liittyviä kysymyksiä, epistemologialla tietäjän ja tiedon väliseen suhteeseen liittyviä seikkoja ja metodologisilla kysymyksillä tiedon hankkimisen menetelmiä (Guba 1990).

Konstruktivistiseen paradigmaan tässä tutkimuksessa nojataan vain oppimistutkimuksen osalta, eikä sitä sovelleta fysiikan tietoon. Fysiikan osalta

sitoudutaan positivistiseen paradigmaan, jossa tieto on ontologialtaan realistista, epistemologialtaan objektivistista ja metodologialtaan kokeellista (Guba 1990). Konstruktivistiselle paradigmalle sen sijaan on ominaista relativistinen ontologia, subjektivistinen epistemologia sekä hermeneuttinen ja dialektinen metodologia (Denzin & Lincoln 1994).

**Taulukko 3.1.** Konstruktivistisen ja realistisen paradigman vertailua (mukaillen Guba 1990; Matthews 1994)

	Konstruktivismi	Positivistmi
Sovellusalue	Yksilön ajattelun ja oppimisen tutkimus	Luonnontieteellinen tutkimus
Ontologia	Relativistinen	Realistinen
Epistemologia	Subjektivistinen Vuorovaikutteinen	Objektivistinen Dualistinen
Metodologia	Hermeneuttinen Dialektinen	Kokeellinen

Positivistinen ontologia on realistinen: todellisuus on olemassa, ja sitä ohjaavat muuttumattomat luonnonlait ja mekanismit. Olioista, laeista ja mekanismeista saatava tieto voidaan esittää ajasta ja kontekstista riippumattomina yleistyksinä, joista osa on kausaalilakeja. (Guba 1990)

Konstruktivistisen ontologian relativistisuudella tarkoitetaan useiden todellisuuksien olemassaoloa. Nämä todellisuudet ovat moninkertaisia, abstrakteja mielen konstruktioita, jotka perustuvat sosiaaliseen vuorovaikutukseen sekä kokemusperäisyyteen (Denzin ja Lincoln 1994). Konstruktiot ovat paikallisia ja yksityiskohtaisia, ja samat todellisuudet jakavien yksilöiden tai ryhmien konstruktiot poikkeavat toisistaan niin muodoltaan kuin sisällöltään. Konstruktiot ovat muuttuvia, kuten ovat niihin liittyvät todellisuudetkin. (Guba & Lincoln 1994) Tämän tyyppinen ajattelutapa voidaan ymmärtää siten, että esimerkiksi opettajan ja oppilaan tulkinnat tietystä asiasta ovat erilaisia, eikä voida kysyä, kumpi tulkinta on totuudenmukaisempi. (Moilanen 2000)

Positivistinen paradigma on epistemologialtaan objektivistinen eli tutkijan on sekä mahdollista että oleellista saada tutkimuksen kohteesta tutkijasta riippumatonta tietoa. (Guba 1990) Konstruktivistisessä paradigmassa epistemologia sitä vastoin on

subjektivistinen: tietäjä ja kohde konstruoivat yhdessä ymmärryksen tarkastettavasta aiheesta (Denzin & Lincoln 1994). Tutkija ja tutkimuksen kohde ovat vuorovaikutteisesti kytkeytyneitä toisiinsa, jolloin tutkimuksen löydökset syntyvät tutkimuksen edetessä. Tämä merkitsee tavanomaisen ontologian ja epistemologian eron katoamista. (Guba & Lincoln 1994)

Metodologialtaan positivismi on kokeellinen: väittämiksi muotoillut kysymykset ja hypoteesit esitetään ennakkoon ja niiden pätevyys testataan kokeellisesti tarkoin määrättyissä olosuhteissa. (Guba 1990) Konstruktivistiset metodologiset proseduurit sitä vastoin ovat hermeneuttisia ja dialektisia (Guba & Lincoln 1994). Vaikka hermeneutiikalla viitattiinkin alunperin tekstin merkityksen tulkintaan, myöhemmin se on laajennut koskemaan myös dialogin ja jopa toiminnan tulkintaa (Kvale 1996). Yksilöllistä konstruktioista voidaan saada tietoa sosiaalisessa vuorovaikutuksessa tutkijan ja tutkittavan välillä tai yksilön tuottamien tekstien välityksellä. Konstruktioita tulkitaan hermeneuttisia eli ymmärtäviä menetelmiä käyttäen, ja niitä vertaillaan dialektisessa keskustelussa. Lopullisena tavoitteena on muodostaa konsensuskonstruktio, joka on aiempia konstruktioita asiantuntevampi ja sofistikoituneempi. (Guba & Lincoln 1994; ks. Myös Kvale 1996).

### 3.3 Tutkimusstrategia

Tutkimusstrategialla tarkoitetaan tutkimuksen menetelmällisten ratkaisujen muodostamaa kokonaisuutta (Hirsjärvi & Huttunen 1992). Käsillä oleva tutkimus noudattaa tapaustutkimuksen strategiaa. Tapaustutkimus on luonteva valinta opetuksen ja oppimisen tutkimukseen, koska siinä pyritään käytännön ongelmien kokonaisvaltaiseen tarkasteluun ja kuvaamiseen. Tapaustutkimuksen kautta myös opetusta voidaan ymmärtää syvällisemmin kaikkien osallistujien kannalta. (Syrjälä ym. 1995)

Tapaustutkimuksen kohteena on sosiaalinen toiminta autenttisessa ympäristössään tutkimuksen kohdistuessa nykyhetkeen, prosessiin, koko ympäristöön ja uuden oivaltamiseen (Yin 1994; Sarantakos 1993; Syrjälä ym. 1995). Toiminta ja kommunikointi muodostavat todellisuuden, jonka tutkija pyrkii vangitsemaan ja tallentamaan, ja se koetaan sellaisena, kuin se ilmenee toimijoiden välisessä vuorovaikutuksessa. (Sarantakos 1993)

Tämän tutkimuksen kohteena on opettajaopiskelijoiden ja aineenopettajien kvantti-olioiden ja -ilmiöiden ymmärtäminen. Ymmärtämistä lähestytään opiskelijoiden selityksissään käyttämien mallien näkökulmasta. Kutakin tapausopiskelijaa ja -opettajaa tarkastellaan yksittäisenä tapauksena, josta pyritään saamaan perusteellista informaatiota. Myös molemmat kurssit ovat itsenäisiä tapauksia.

Tapaustutkimukselle on ominaista avoimuus ja joustavuus: tutkijan toiminnalle ei ole olemassa sitä rajoittavia tai ennalta määrättyyn päämäärään ohjaavia sääntöjä. (Sarantakos 1993) Tutkimusprosessi voi jopa muodostua jännittäväksi seikkailuksi, jossa löydetään uusia ilmiötä kuvaavia yhteyksiä, luodaan uusia käsitteitä ja jonka kautta todellisuus ymmärretään entistä syvemmin tutkimusaineiston näkökulmasta. (Syrjälä ym. 1994)

Tutkittavien tapausten valintaan on kiinnitettävä riittävästi huomiota. Staken (1995) suositusten mukaan tapaukset tulee valita siten, että niiden kautta opitaan eniten. Tapausten tulisi olla luontevia tutkittavia ja halukkaita osallistumaan tutkimukseen. Valintakriteereinä voidaan myös pitää tutkimuskohteen saavutettavuutta ja edellytyksiä luottamuksellisten suhteiden kehittymiselle (Syrjälä ym. 1994).

Tapaustutkimus tunnetaan trianguloutuneena tutkimusstrategiana. Triangulaatiolla eli ”kolmiomittauksella” tarkoitetaan esimerkiksi useiden aineistojen, tutkijoiden tai teorioiden käyttöä (Stake 1995; Tuomi & Sarajärvi 2004), ja sen avulla voidaan varmistaa tutkimuksen laatua. On kuitenkin mahdollista, että esimerkiksi tutkijatriangulaatiota käytettäessä eri tutkijat saavat eriäviä tuloksia erilaisten metodien soveltamisen tai erilaisen suuntautuneisuuden vuoksi. Triangulaatio vastaa myös tähän ongelmaan: sen avulla tutkija pystyy voittamaan ennakko-oletuksensa, koska yhteen näkökulmaan rajoittuminen on mahdotonta (Denzin 1978).

Tapaus opetuskokeiluineen on myös raportoitava riittävällä tarkkuudella tutkimuskysymyksiin saatavien vastausten taustojen ymmärtämiseksi. Tarkka kuvaus mahdollistaa myös sen, että raportin lukijan on mahdollista arvioida tulosten uskottavuutta. (Syrjälä ym. 1994)

### 3.4 Tutkimusprosessin vaiheet

Tutkimusprosessi käynnistyi syksyllä 2002, jolloin järjestettiin ensimmäinen tutkimusprojektiin osallistuvien fysiikan opettajien ja oppimisen tutkijoiden tapaaminen, ja jonka jälkeen laadittiin tutkimussuunnitelma (taulukko 3.2, s. 50). Vuoden 2003 aikana suoritetun taustatyön pohjalta kehitettiin *Modernia fysiikkaa opettajille* -nimen saanut fysiikan opettajille ja opettajaopiskelijoille suunnattu kurssi, jonka tutkimukseen liittyvä osuus on kuvattu yksityiskohtaisemmin luvussa IV. Kurssi siihen liittyvine tutkimuksineen toteutettiin ensimmäisen kerran kevätlukukaudella 2004 toisen toteutuksen ajoittuessa lukuvuoteen 2004/2005. Tulosten analysointi aloitettiin ensimmäisten aineistojen keräämisen jälkeen keväällä 2004, ja se saatiin lopulliseen päätökseen keväällä 2006. Raportin kirjoittaminen käynnistyi varsinaisesti syksyllä 2005, vaikka joitakin luonnoksen omaisia osioita oli olemassa jo aiemmin.

**Taulukko 3.2.** Tutkimusprosessin vaiheita.

	Syksy 2002	Kevät 2003 Syksy 2003	Kevät 2004	Syksy 2004 Kevät 2005	Syksy 2005	Kevät 2006 Syksy 2006
JoY/HY yhteistyön alku ja tutkimussuunnitelman laatiminen	x					
Tutkijakoulutuksen aloittaminen		x				
Kirjallisuuteen perehtyminen ja tutkimusmetodiikan opiskelu		x	x	x		
Kurssin ja kurssimateriaalien kehitystyö		x	x			
Kurssin ja tutkimuksen toteutus I			x			
Kurssin ja tutkimuksen toteutus II				x		
Tulosten analysointi			x	x	x	x
Raportointi					x	x

### 3.5 Tutkimukseen osallistujat

Tutkimukseen osallistui kahdeksan aineenopettajaksi opiskelevaa henkilöä ja 21 työssä olevaa aineenopettajaa.

Kahdeksasta opettajaopiskelijasta yhtä lukuun ottamatta kaikki opiskelivat fysiikkaa pääaineenaan. Opiskelijat edustivat eri vuosikursseja, mutta olivat kaikki kuitenkin vähintään kolmannella vuosikurssilla. Keskimäärin he olivat opiskelleet fysiikkaa 40 opintoviikon ja pedagogisia opintoja 25 opintoviikon verran.

Opettajien kurssin osallistujat olivat fysiikan pätevöittämisskoulutukseen osallistuvia matematiikan, fysiikan ja kemian opettajia. Kurssin aloittaneista 21 henkilöstä matemaatikkoja oli 17 sekä fyysikkoja ja kemistejä molempia kaksi. Kurssin keskeytti kolme henkilöä sen eri vaiheissa. Peruskoulun ja lukion opettajia opiskelijoista oli yhtä monta, yhdeksän. Muissa oppilaitoksissa työskenteli kolme opettajaa.

Opiskelijoista seitsemän oli suorittanut kvantti- ja atomifysiikan aineopintojen kurssin: heistä yksi oli suorittanut myös laudatur -tasoisen kvanttifysiikan kurssin. Opettajista 16 muisteli omiin opintoihinsa kuuluneen kvantti- ja atomifysiikan opintoja. Lisäksi kahdeksan oli opettanut lukion modernin fysiikan kurssia ainakin kerran opettajauransa aikana.

Opettajien opetuskokemuksen mukaista jakaumaa esittää taulukko 3.3. Tutkimuksessa raportoitavien tapausopiskelijoiden ja -opettajien valinnasta kerrotaan luvussa 5.1.9 (s. 105).

**Taulukko 3.3.** Opettajien opetuskokemuksen mukainen jakauma.

Opetuskokemus vuosina	Frekvenssi
Alle 5	7
5-9	7
10-14	4
15-19	1
Yli 20	2
Yhteensä	21

### 3.6 Aineistonkeruumenetelmät

Tutkimusaineistoa hankittiin eri menetelmiä käyttäen. Opiskelijat ja opettajat osallistuivat testeihin kurssin alussa ja lopussa. Heidän palauttamansa etä- ja kotitehtävät sekä luentojen aikana tekemänsä luentotehtävät kopioitiin tutkimusaineistoksi. Osallistujat lisäksi vastasivat palautekyselyyn kurssin lopussa.

Tapaustutkimusopiskelijoita ja -opettajia haastateltiin kurssin aikana 4-5 kertaa. Haastattelut videoitiin ja nauhoitettiin, kuten myös molempien kurssien opetus kokonaisuudessaan. Opetuksen videoinnin kohteena oli opettajan toiminta, ja se pyrittiin suorittamaan siten, että se häiritsisi mahdollisimman vähän sekä kurssin opetusta että opiskelijoiden toimintaa opetuksen aikana. Tässä tutkimuksessa esi- ja loppu-testien vastaukset sekä tapaustutkimusopiskelijoiden ja -opettajien haastattelut muodostavat tutkimusaineiston suurimman osan.

#### 3.6.1 Esitutkimus

Esitestin ja haastattelumenetelmän toimivuuden testaamiseksi eräs tutkijana työskentelevä fysiikan opettaja vastasi esitestiin, minkä jälkeen häntä haastateltiin suunnitellun haastattelurungon avulla. Näin muodostui tuntuma siitä, onko koehenkilö ymmärtänyt testin kysymykset halutulla tavalla ja millaisia vastauksia kysymyksiin on odotettavissa. Lisäksi esitestiä testattiin kurssilla, johon osallistui matemaattisten

aineiden opettajia. Näin saatu koeaineisto auttoi edelleen täsmentämään joidenkin esitestin kysymysten asettelua.

### 3.6.2 Esitesti

Esitesti sisälsi sekä avoimia että tehtäväperustaisia kysymyksiä (ks. liite 1, s. 245). Avoimissa kysymyksissä pyydettiin määrittelemään kurssin aihealueen fysiikan sisällönanalyysissä keskeisiksi nousseita käsitteitä. Myös hiukkasen käsitettä, klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan eroavuuksia ja yhtenevyyksiä sekä säilymislakien hallintaa tutkittiin avoimilla kysymyksillä. Kvantti-ilmiöistä mustan kappaleen säteilyn ja molaarisen lämpökapasiteetin lämpötilariippuvuuden hallintaa selvitettiin tehtäväpohjaisten kysymysten avulla.

Esitettiin vastasivat kaikki kahdeksan opiskelijaa. Toisen opetusryhmän eli opettajien testausta varten esitestiä hieman muokattiin (ks. liite 2, s. 248). Joidenkin kysymysten asettelua muokattiin selkeämmäksi ja joitakin käsitteenmäärittelyjä jätettiin kokonaan pois. Aloittaneesta 21 opettajasta 20 vastasi esitettiin.

### 3.6.3 Haastattelut

Haastattelu voidaan ymmärtää keskusteluksi, jolla on rakenne ja tavoite. Haastattelu tunkeutuu arkipäiväistä keskustelua syvemmälle; sille on tyypillistä huolellinen kysymyksenasettelu ja tarkka kuuntelu, minkä tavoitteena on perusteellisen tiedon hankkiminen. Semistruktuoidun tutkimushaastattelun tarkoituksena on hankkia haastateltavan maailmasta tarkasteltavan ilmiön merkitykseen liittyviä kuvauksia. Haastattelumenetelmän rikkaus onkin juuri siinä, että sen avulla voidaan vangita oppijoiden erilaisia käsityksiä tarkasteltavasta ilmiöstä ja kuvata oppijan maailmojen moninaisuutta. (Kvale 1996)

Laadullista tutkimushaastattelua kutsutaan usein semistruktuoiduksi tai teemahaastatteluksi. Tällä tarkoitetaan sitä, että haastattelu ei ole avoin keskustelu eikä struktuoitu kysely, vaan jotain siltä väliltä. Haastattelun toteutusta ohjaa tiettyjen teemojen ympärille keskittyvä haastattelurunko, joka voi myös sisältää valmiiksi mietittyjä kysymyksiä. (Kvale 1996)

Haastatteluissa käytettiin valmiiksi mietittyjen kysymysten ja niitä tarkentavien lisäkysymysten lisäksi haastatteluja varten suunniteltuja tehtäviä. Haastatteluissa pyrittiin kuitenkin välttämään ”opettamista”, joten esimerkiksi tilanteessa, jossa haastateltava ei vaikuttanut tuntevan tarkastelun kohteena olevaa ilmiötä, ei sitä haastateltavalle nimetty. Sen sijaan aihetta lähestyttiin hieman eri näkökulmasta pyrkien näin saamaan esille haastateltavan vähäinkin ilmiöön liittyvä ymmärrys. Haastatteluissa ei myöskään otettu kantaa haastateltavan pohdintoihin.



Haastatteluissa pyrittiin luomaan ilmapiiri, jossa haastateltava rentoutui ja tilanne muodostui keskustelevalaksi. Syrjälän ym. (1994) mukaan avoimessa ilmapiirissä haastateltava kertoo sen, mitä hän oikeasti ajattelee, eikä sitä mitä hän luulee haastattelijan tarkoittavan.

Tapausopiskelijoita haastateltiin ensimmäisellä kurssilla viidesti ja toisella kurssilla neljä kertaa. Haastattelujen kesto vaihteli noin puolesta tunnista tuntiin saakka haastateltavan ja haastattelukerran mukaan. Haastattelujen ajoittuminen opiskelijoiden ja opettajien kursseilla sekä haastattelujen teemat on esitetty taulukoissa 3.5 (s. 54) ja 3.6 (s. 55). Kuten taulukoista havaitaan, opiskelijoiden ja opettajien tietämystä testattiin tai heitä haastateltiin tarkasteltaviin ilmiöihin ja käsitteisiin liittyen ennen aiheen opetusta (esi) ja ainakin yhden kerran opetuksen jälkeen (jälki). Kahdella esihaastattelulla pyrittiin selvittämään, innostaako haastatteluun osallistuminen opiskelemaan asioita itsenäisesti. Vastaavasti kahden jälkihaastattelun avulla voidaan nähdä, mikäli tarkasteltavan aiheen ymmärtäminen muuttuu tietyssä kurssin vaiheessa. Fotonia ja elektronia tarkastelevia osioita esiintyi kaikissa haastatteluissa.

Eräät haastatteluosiot toteutettiin mukaillulla *stimulated recall* -menetelmällä (STR). STR-menetelmässä haastattelussa palautetaan haastateltavan mieleen haastattelun aiheena oleva aiempi tilanne yleensä audio- tai videotallennetta käyttäen (Patrikainen & Toom 2000). Tässä tutkimuksessa STR-menetelmää käytettiin haastateltavan aiemmissä tilanteissa, esitestissä tai haastatteluissa, muodostamien määritelmien ja näkemysten tarkasteluun, jotka esitettiin hänelle sanallisesti.

**Taulukko 3.5.** Aiheiden esiintyminen haastatteluissa ja testeissä opettajaopiskelijoiden kurssilla kevätlukukaudella 2004. Lyhenteet: esi = ennen opetusta tapahtuva, jälki = opetuksen jälkeen tapahtuva haastattelu tai testaus, STR = stimulated recall.

Metodi	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4	Haastattelu 5
Viikko	3 + 4	7	11	14 + 15	39
TEEMA					
Valo- sähköinen ilmiö	Esi1: Koe ja ilmiö		Jälki1: Kvantittu- minen		
Mustan kappaleen säteily	Esi1: Säteily- kuvaajat		Jälki1: Kvantittu- minen	Jälki2: Ilmiö ja säteilylait	Jälki3: Ilmiö
Comptonin ilmiö	Esi1: Ilmiö	Esi2: Sirontakoe + tulokset			Jälki1: Ilmiö
Hiukkanen	Esi1: määritelmä				
Elektroni ja fotonit	Esi1: määritelmät	Ominai- suuksien selittäminen	Haastattelu 1:n STR	Kvantti- olioisuus	Havaitse- minen kvantti- luonne

**Taulukko 3.6.** Aiheiden esiintyminen haastatteluissa ja testeissä opettajien kursseilla lukuvuonna 2004-2005. Lyhenteet: esi = ennen opetusta tapahtuva ja jälki = opetuksen jälkeen tapahtuva haastattelu tai testaus, STR = stimulated recall.

Metodi	Esitesti	Haastattelu 1	Haastattelu.2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4
Viikko	37	40	49	13	23
TEEMA					
Valo- sähköinen ilmiö	Esi1: Ilmiö	Esi2: Ilmiö			Jälki1: Ilmiö
Mustan kappaleen säteily	Esi1: ilmiö ja säteily- kuvaajat	Esi2:ilmiö ja säteily- kuvaajat	Jälki1: ilmiö		Jälki2: ilmiö ja säteilylait
Comptonin ilmiö		Esi1:Ilmiö	Esi2: Sirontakoe ja tulokset		Jälki1: Ilmiö
Hiukkanen	Esi1: Määritelmä			Jälki1: Haastattelu 1:n STR	
Elektroni ja fotonit		Määritelmät	Ominai- suuksien selittäminen	Haastattelu 1:n STR	Kvantti- olioisuus

### 3.6.4 Lopputesti ja palautekysely

Lopputesti suunniteltiin siten, että sen avulla saadaan tutkimustehtävään vastaamisen kannalta hyödyllistä tietoa. Se koostui eri tyyppisistä tehtävistä: käsitteiden määrittelyistä, tehtäväpohjaisista kysymyksistä, essee-tyyppisestä tehtävästä sekä kaavojen esittämisestä merkityksineen. Näytteitä lopputestien tehtävistä on esitetty liitteissä 3 ja 4 (s. 250 ja 251).

Kurssipalautteen keräämiseksi suunniteltiin kyselylomake, jossa kurssilaiset vastasivat esitettyihin väittämiin viisiportaisella likert-asteikolla. Lomakkeessa oli tilaa myös väittämien kommentoimista varten. Toisen ryhmän palautekyselyyn lisättiin oman toiminnan arviointiin liittyvä väittämöso, mutta muilta osin palautekysely oli sama kuin ensimmäisessä ryhmässä (liite 5, s. 252).

Kurssin loppukokeen ja palautekyselyn analyysistä saatavat tulokset voivat toimia tapaustutkimusopiskelijoiden ja -opettajien haastatteluista tehtäviä johtopäätöksiä

tukevina tai niitä kumoavina evidensseinä. Useiden eri aineistonkeruumenetelmien käyttö eli menetelmätriangulaatio lisää tutkimuksen luotettavuutta (Eskola & Suoranta 1998; Stake 1995; Tuomi & Sarajärvi 2004).

### 3.7 Aineiston käsittely ja analysointi

Laadullisen aineiston analyysi on useista osatekijöistä muodostuva prosessi, jossa aineisto hajotetaan merkitysyksiköiksi ja joka tähtää johtopäätösten esittämiseen. Analyysi tapahtuu syklisenä, systemaattisena ja reflektiivisenä prosessina, jossa aineistoa tiivistetään, järjestellään ja tulkitaan. (Sarantakos 1993)

Hermeneuttisella tulkinnalla tarkoitetaan tulkintaa, jonka tavoitteena on saavuttaa luotettava ja yhteinen ymmärrys tutkimuksen kohteena olevasta ilmiöstä. Tulkinta tapahtuu hermeneuttisen kehän avulla, joka on eräänlainen työkalu tarkastelun kohteena olevan ilmiötä tutkimiseen. (Schwandt 1994) Hermeneuttisessa kehässä tulkittavan aineiston eri osien merkitykset määrittyvät aineiston kokonaisvaltaisen merkityksen kautta. Prosessissa osien lähempi tarkastelu voi muuttaa kokonaisuuden merkitystä, joka edelleen voi muuttaa osien merkitystä ja niin edelleen. (Kvale 1996) Hermeneuttinen kehä kuvaa täten ymmärtämisen etenemistä syklisenä prosessina (Schwandt 1994).

#### 3.7.1 Esitestin ja lopputestin vastaukset

Esitestien vastauksiin perehtyminen aloitettiin niiden huolellisella lukemisella, jonka kautta muodostui kokonaiskuva opiskelijoiden vastauksista. Koska esitesti oli melko laaja, kysymyksistä valittiin analysoitavaksi vain tutkimuksen kannalta tärkeimmät, ymmärtämistä mittaavat käsitteelliset kysymykset ja ilmiöihin liittyvät tehtävät. Näin valittujen esitestin kysymysten vastaukset litteroitiin Excel-ohjelmaan, jota käytettiin myös vastausten luokitteluun.

Koska lopputesti toimi kurssin loppukokeena, arvioitiin se testin suunnittelun yhteydessä luodun kriteeristön avulla. Lopputestin vastausten analyysi suoritettiin suoraan tekstimuotoisista vastauksista.

#### 3.7.2 Haastattelut

##### A. Haastattelujen purkaminen

Tutkimuksen edetessä raportoitavien tapaustutkimusoppijoiden lukumäärä rajattiin kahteen opiskelijaan ja kahteen opettajaan. Haastattelut (18 haastattelua, kestot n. ½-1 h) litterointiin digitoiduilta ääninauhoilta, ja haastattelujen digitaalista videoaineistoa

käytettiin puheen epäselvien kohtien varmistamiseen. Litteroitua tekstiä kertyi haastateltavasta riippuen 17-31 sivua. Joidenkin haastateltavien puheessa esiintyneen murteen vuoksi puhetta on yleiskielistetty tutkittavien identiteetin suojaamiseksi. Samoin on menetelty esimerkiksi ”niinku” ja ”tota noin” -tyyppisten ilmaisujen kohdalla niiden esiintyessä haastateltavan puheessa merkityksettöminä. Tutkimustuloksien esittelyssä käytetään haastateltavien puheesta litteroituja näytteitä Sutisen (2005) merkintätapaa mukaillen (taulukko 3.7).

**Taulukko 3.7.** Haastattelunäytteiden merkinnät ja niiden tulkinta (mukaillen Sutinen 2005).

Merkintätapa	Tulkinta
Kursiivi	Haastattelijan puhe/kysymys testissä
(-)	Puheessa oleva tauko
Alleviivaus	Haastateltavan puheessaan korostama kohta
(( ))	Epäselvä kohta puheessa
[ ]	Tutkijan kommentti
(...)	Puhetta on lyhennetty

Taulukossa 3.7 esitettyjen merkintöjen käyttö haastateltavan puheen lainauksissa helpottaa lainausten lukemista ja tekee niistä ymmärrettävämpiä. Raportoitavaksi valitut tapaustutkimusopiskelijat vaikuttivat haastatteluissa sangen avoimilta. Joissakin haastatteluissa haastateltava saattoi esimerkiksi pysähtyä pohtimaan tarkastelun kohteena olevaa aihetta syvällisesti, tai innostua kertomaan jotakin sellaista, joka ei varsinaisesti kuulunut tutkimuksen aihepiiriin ytimeen. Näitä pohdintoja ei kuitenkaan haluttu keskeyttää, vaikka haastattelujen kestot monesti venyivätkin.

## B. Haastattelujen analyysi

Aineistoon tutustuminen käynnistyi jo haastatteluja suoritettaessa ja syventyi laajamittaisessa litterointityössä. Koska tavoitteena oli tapaustutkimusopiskelijoiden ja -opettajien oppimisen kuvaaminen prosessina, haastatteluaineistosta poimittiin tutkimuksen kiinnostuksen kohteena olevat osiot kronologinen järjestys mahdollisuuksien mukaan säilyttäen. Haastatteluista kirjoitettiin kuvaukset, joissa tutkittavan käsitykset kuvattiin yksityiskohtaisesti lyhyinä narratiiveina ja niihin

liitettiin selventäviä lainauksia haastattelutilanteista. Seuraavassa vaiheessa haastateltavan puhetta pyrittiin ymmärtämään syvällisemmin, jotta voitaisiin tehdä tulkintoja hänen käsityksistään. Haastateltavan käsityksiä verrattiin kurssin opetusmalleihin, raportoituuihin oppijoiden käsityksiin ja muuhun fysiikan teoriaan, johon hän puheessaan viittasi. Tässä työvaiheessa tutkimusaineisto oli luettava läpi lukuisia kertoja sekä haastatteluittain että myös kokonaisuudessaan. Muodostetut tulkinnat lisättiin oppimisprosessikuvaukseen.

Haastattelujen fotonia ja elektronia käsittelevät osiot analysoitiin ontologisten kategorioiden teorian näkökulmasta, ja analyysin pohjalta muodostettiin oppijan haastattelussa esille tuomaa elektronia ja fotonia koskevaa tietoa kuvaavat käsitteverkot (Eysenck & Keane 2005). Käsitteverkoissa ilmenevät oppijan elektroniin ja fotonin liittämiä käsitteiden väliset suhteet eli Tallin ja Vinnerin (1981) teoriaa mukaillen elektronin ja fotonin käsittekuvat. Käsitteverkkoja ja niissä esiintyviä ominaisuuksia tarkastelemalla voidaan tehdä päätelmiä siitä, mihin ontologiseen kategoriaan elektroni ja fotonin oppijan käsityksissä ja malleissa kuuluvat.

Koska valmiit oppimisprosessikuvaukset osoittautuivat sivumäärällisesti pitkiksi, *yksityiskohtaisesti* raportoitavien tapausten lukumäärä vähennettiin kahdesta tapauksesta yhteen molempien opetusryhmien kohdalla. Lisäksi kahden opiskelijan prosesseista päätettiin esittää lyhemmät loppuyhteenvedot. Neljä yksityiskohtaista prosessikuvausta olisivat olleet melko vaativia lukijaa kohtaan. Samasta syystä rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle myös oppijoiden käsitykset elektronin ja fotonin epistemologiasta, eli siitä, miten niiden olemassaolosta ja ominaisuuksista saadaan tietoa.

Kurssin jälkeen tehdyissä haastatteluissa kartoitettiin lisäksi tutkittavien suhtautumista kurssiin ja sen menetelmiin. Tämän haastatteluosion ja kaikkien haastattelujen perusteella muodostettiin yleiskuvaus tutkittavasta oppijana kurssilla.

### 3.7.3 Palautekyselyt

Palautekyselyjen määrällisten kysymysten vastaukset koodattiin ja siirrettiin SPSS-ohjelmaan, jonka avulla ne esitettiin graafisesti. Lisäksi opiskelijoiden sanalliset palautteet litteroitiin.

### 3.8 Laadullisen tutkimuksen luotettavuuden tarkastelu

Tutkimuksen hyvyyttä koskevan kriteeristön määrää tutkimuksen paradigma, joten eri paradigmoihin sitoutuneet tutkimustraditiot noudattavat omia hyvyyden kriteeristöjään. Laadullisen tutkimuksen arvioinnin tulee täten perustua konstruktivistisen paradigman perusoletuksille: relativistiselle ontologialle, subjektivistiselle epistemologialle ja hermeneuttiselle metodologialle.

Konstruktivistisen paradigman ontologian relativistisuus tarkoittaa sitä, että tiedon totuudesta tai järkevyydestä ei voida sanoa mitään vaan on tyydyttävä kuvaamaan ne tavanomaiset oikeellisuusmenettelyt, joita yhteisö käyttää tutkimusalan yhteydessä (Smith 1990). Positivistisen käsityksen tiedosta yksilön todellisuuden heijastumana on korvannut käsitys tiedosta todellisuuden sosiaalisena, monella tavoin rakennettuna konstruktiona (Kvale 1996; Smith 1990). Merkitysten, pyrkimysten ja päämäärien todellisuus perustuu tulkintoihin tai se todentuu tulkinnassa, joten subjekti-objekti-kahtiajako menettää merkityksensä tarkastelun kohdistuessa tutkijan ja tutkittavan väliseen vuorovaikutukseen (Smith 1990). Konstruktivistisessa paradigmassa ei ole itsenäisesti olemassa olevia merkitystodellisuuksia, eikä epistemologisessa mielessä ole järkevää erotella merkitystä<sup>22</sup> ja merkityksellisyyttä<sup>23</sup>. (Smith 1990)

Konstruktivistisen paradigman hermeneuttisuutta ei tule Smithin (1990) mukaan ymmärtää objektiivisen ymmärtämisen metodologiaksi, vaan ymmärtäminen tulee ajatella osaksi merkityksen muodostumisen prosessia. Konstruktivismissa metodi paljastaa vain sen, mikä on metodille luontaista. Uusi tieto ei ole seurausta itsenäisesti olemassa olevien merkitysten metodologisesta asianmukaisesta esittämisestä, vaan se on tulos dialogisesta prosessista itsensä tiedostavan henkilön ja kohteen, kuten tekstin tai toisen henkilön merkityksellisten ilmaisujen kanssa. Pätevät tietoväittämät ilmenevät yhteisön jäsenten välisissä keskusteluissa, joissa tarkastellaan ristiriitaisia tulkintoja ja toimintamahdollisuuksia. (Smith 1990)

#### 3.8.1 Metodologinen ja analyttinen luotettavuus

Egon Guba esitti vuonna 1981 kriteeristön, jonka voidaan arvioida kvalitatiivisen tutkimuksen metodologista ja analyttistä luotettavuutta. Hän antoi kriteeristölle nimen *trustworthiness* (suom. luotettavuus), jotta se erottuisi positivistisen paradigman yhteydessä käytetystä käsitteestä *rigor*<sup>24</sup>. Uusi käsite on rinnakkainen sisäiselle ja ulkoiselle validiteetille, reliabiliteetille ja objektiivisuudelle, mutta Guba määritteli sen

---

<sup>22</sup> Engl. meaning

<sup>23</sup> Engl. significance

<sup>24</sup> Yksinkertaistaen kvantitatiivisen tutkimuksen validiteetti kuvaa sitä, mittaako käytetty mittari sitä mitä halutaan.

merkityksen uudelleen. Uuden luotettavuuskriteetistön osakriteereitä ovat *credibility*, *transferability*, *dependability* ja *confirmability*. (Lincoln 1990) Suomenkielisinä vastineina on käytetty vastaavuutta, siirrettävyyttä, tutkimustilanteen arviointia ja vahvistettavuutta (Tynjälä 1991).

#### A. Vastaavuus

Vastaavuuden kriteerillä tarkoitetaan sitä, vastaavatko tutkimuksessa muodostetut rekonstruktiot tutkittavien todellisuuksia (Guba 1990). Syrjälä ym. (1995) viittaavat vastaavuuden yhteydessä aineiston aitouteen: *aito* aineisto käsittelee tutkijan ja tutkittavan kannalta samaa asiaa. Aitouden varmistamiseksi tutkijan tulee osoittaa, että tutkittavat ovat ilmaisseet käsityksensä tutkittavana olleesta asiasta ja ilmaisseet sen, mitä he todella ajattelevat, eivätkä sitä mitä he luulevat heiltä odotettavan. Syrjälän ym. (1995) mukaan monipuolinen aineistonkeruu parantaa vastaavuutta.

#### B. Siirrettävyys

Lincolnin ja Guban (1985) mukaan laadullisessa tutkimuksessa ei ole mielekästä puhua tulosten yleistettävyydestä, vaan tulee puhua niiden *siirrettävyydestä*. Siirrettävyys riippuu siitä, miten hyvin tutkittu ympäristö ja sovellusympäristö vastaavat toisiaan. Kvale (1996) käyttää laadullisen tutkimuksen yhteydessä termiä kontekstualisaatio.

Tutkija ei tunne sovellusympäristöä, joten vastuu tutkimustulosten siirrettävyydestä jää tulosten soveltajalle. Jotta tulosten soveltaminen olisi mahdollista, tutkijan on kuvattava tutkimusaineisto ja itse tutkimus niin hyvin, että tulosten soveltaminen on mahdollista. (Lincoln & Guba 1985; Tynjälä 1991)

#### C. Tutkimustilanteen arviointi

Tynjälän (1991) mukaan laadullisessa tutkimuksessa ei voida keskustella tulosten reliabiliteetista eli tulosten pysymisestä muuttumattomina tutkimus toistettaessa, vaan on pyrittävä arvioimaan itse tutkimustilannetta. Laadullisessa tutkimuksessa tutkimustilanteet ovat ainutkertaisia, dynaamisia ja prosessiluonteisia, joten perinteinen reliabiliteettitarkastelu on hylättävä (Syrjälä ym. 1995). Tutkimuksen toteutuksessa, haastattelijassa, tutkittavassa ilmiössä tai olosuhteissa tapahtuvat muutokset voivat vaikuttaa haastattelun tuloksiin. Joskus haastattelutilanne voi toimia myös tiedostusprosessina, joka saa aikaan haastateltavan vastausten muuttumisen. (Tynjälä 1991) Kun kyseessä on esimerkiksi fysiikan ymmärtämiseen ja oppimiseen liittyvä tutkimus, haastattelut voivat tahattomasti toimia oppimistilanteina, jolloin haastateltavan vastaukset samoihin kysymyksiin muuttuvat (Niedderer 2004). Samoin



tutkittaessa opetuksen aiheuttamaa muutosta oppijan käsityksiin, haastateltavan vastausten muuttuminen on itse asiassa tutkimuksessa tavoiteltua tietoa, kuten myös käsillä olevassa tutkimuksessa.

#### D. Vahvistettavuus

Konstruktivistisessä paradigmassa subjekti-objekti -dualismi hylätään, joten ei voida myöskään puhua tutkimuksen objektiivisuudesta (Lincoln & Guba 1995). Laadullisessa tutkimuksessa tieto rakentuu tutkijan ja tutkittavan välisessä vuorovaikutuksessa, eikä tutkijan roolina ole toimia täysin ulkopuolisena tarkkailijana (Syrjälä ym. 2005). Tutkimuksella ei pyritä tavoittelemaan perinteisessä mielessä objektiivista tietoa, vaan pikemminkin näkökulmia tutkittavaan ilmiöön. Tutkijan omat lähtökohdat voivat vaikuttaa tutkimustyöhön, ja ne on kuvattava tutkimuksessa, jotta lukija pystyy huomioimaan ne. Pattonin (1990) suositusten mukaan sellainen tutkijaan liittyvä henkilökohtainen ja ammatillinen tieto, joka voi vaikuttaa tutkimusaineiston keräämiseen, analyysiin ja tulkintaan, on tuotava eksplisiittisesti esille.

Laadullisen tutkimuksen toteutus on myös dokumentoitava huolellisesti. Tutkimusprosessin huolellinen kuvaus mahdollistaa intersubjektiiivisen arvioinnin; tutkimuksen lukija pystyy seuraamaan tutkimuksen kulkua ja arvioimaan sitä. Pattonin (1990) mukaan tällöin ei ole kuitenkaan kyse objektiivisuudesta, vaan tutkijan luotettavuudesta, uskottavuudesta, rehellisyydestä ja tasapainosta.

Guba ja Lincoln (1985) esittävät, että laadullisen tutkimuksen vahvistettavuus saavutetaan, kun tutkimustulosten vastaavuus ja siirrettävyys on varmistettu. Arvioinnin suorittamiseen olisi suositeltavaa käyttää myös ulkopuolisia arvioijia eli tutkijatriangulaatiota.

#### 3.8.2 Luotettavuuden arviointi laaduntarkkailuprosessina

Kvalen (1996) näkökanta laadullisen ja erityisesti haastattelututkimuksen luotettavuustarkastelulle poikkeaa Guban suosituksista. Kvale ei kannata uusien luotettavuutta kuvaavien käsitteiden käyttöönottoa, vaan määrittelee reliabiliteetin ja validiteetin käsitteiden merkitykset eri tavoin laadullisen haastattelututkimuksen yhteydessä.

Reliabiliteetin käsitteellä Kvale (1996) tarkoittaa tutkimuksen tulosten johdonmukaisuutta ja ristiriidattomuutta. Haastattelututkimuksen reliabiliteettia voidaan arvioida haastattelujen toteutuksen, aineiston litteroinnin ja analysoinnin näkökulmasta. Haastattelujen reliabiliteettia kuvastaa se, että haastateltavaa ei johdatella sanavalinnoin, painotuksin tai ilmein. Litteroinnin johdonmukaisuuden tarkistamiseksi voidaan yksinkertaisesti laskea eri litteroijien tekemien litteraattien sanamäärät ja katsoa ovatko

ne yhtä suuret. Litteroinnin laatua voidaan parantaa laatimalla tarkka ohjeistus litteroinnin suorittamiselle, ja sen noudattamisesta voidaan varmistua pistokokein. Aineiston analyysin johdonmukaisuutta ja ristiriidattomuutta voidaan lisäksi parantaa rinnakkaisluokittelijan avulla. Tässä tutkimuksessa litterointityöhön ei osallistunut muita henkilöitä, joten haastattelujen litterointi on tehty yhdenmukaisella tavalla.

Kvalen (1996) mukaan haastattelututkimuksessa validointi tulisi nähdä eräänlaisena tutkimustyön laaduntarkkailuprosessina, jonka tulisi liittyä koko tutkimusprosessiin kaikkine sen vaiheineen. Mielestäni tämä pätee laadulliseen tutkimukseen yleisestikin, joten olen laajentanut kriteeristön koskemaan tämän tutkimuksen koko prosessia. Kvalen haastattelututkimuksen kriteeristölle pohjautuvat, laadullista tutkimusta yleisesti koskemaan laajennetut tutkimuksen laadun kriteerit on esitetty taulukossa 3.8 (s. 63).

Taulukossa 3.8 esitetään ne kysymykset, joihin tutkijan tulee vastata tutkimusprosessin aikana. Jo aihepiirin rajauksessa tutkijan tulee pohtia teoriataustan, teoriasta nousevien hypoteesien ja tutkimuskysymysten välistä suhdetta. Tutkimuksen suunnittelussa ja toteutuksessa on pyrittävä kurinalaisuuteen. Toteuttamalla tutkimusaineiston kerääminen huolellisesti voidaan lisätä saatujen vastausten uskottavuutta. On myös tärkeää varmistaa saatujen vastausten merkityksiä ja tutkimuksessa saatua tietoa. Myös litteroinnin suorittaminen tulee tehdä uskottavasti ja tutkimuksen tavoitteisiin nähden asianmukaisella tavalla. Aineiston analysointivaiheessa on pohdittava litteroitujen haastattelukysymysten, haastateltavan vastausten ja niiden tulkinnan uskottavuutta. Analysointivaiheen jälkeen tehtyä luotettavuusarviointia ja sen merkitystä voidaan arvioida kokonaisvaltaisesti. Kvalen (1996) mukaan myös raportoinnin uskottavuutta sekä tutkimuksen tulosten ja raportoinnin välistä suhdetta on tarkasteltava tutkimuksen luotettavuuden varmistamiseksi. Myös lukijat osallistuvat tutkimuksen raportoinnin luotettavuuden arviointiin. Käsillä olevan tutkimuksen luotettavuuden tarkasteluun palataan luvussa 6.2.

**Taulukko 3.8.** Haastattelututkimuksen kriteeristö laajennettuna koskemaan laadullista tutkimusta yleisesti (Kvalea 1996 tulkiten).

Tutkimuksen vaihe	Tutkimukselle esitettävät kysymykset
1. Aihepiirin rajaus	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Ovatko tutkimuksen teoreettiset ennakkoletukset järkeviä?</li> <li>♦ Onko tutkimuskysymykset johdettu loogisesti teoriataustasta?</li> </ul>
2. Suunnittelu	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Onko tutkimus suunniteltu perusteellisesti?</li> <li>♦ Onko tutkimuksessa käytetty asianmukaisia menetelmiä?</li> </ul>
3. Tutkimusaineiston kerääminen (haastattelut)	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Onko tutkimusaineiston kerääminen (haastattelut/kyselyt) toteutettu hyvin?</li> <li>♦ Ovatko tutkittavien lausunnot/vastaukset uskottavia?</li> <li>♦ Varmistetaanko haastateltavan lausuntojen/vastausten merkityksiä ja tutkimuksessa saatua tietoa?</li> </ul>
4. Litterointi	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Onko litterointi suoritettu asianmukaisesti?</li> <li>♦ Soveltuuko litteroidun tekstin kielellinen tyyli tutkimuksen luonteeseen?</li> </ul>
5. Analysointi	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Ovatko litteroidun tekstin kysymykset järkeviä ja onko ne tulkittu järkevästi?</li> </ul>
6. Luotettavuuden arviointi	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Mistä osatekijöistä tarkasteltavan tutkimuksen luotettavuuden arviointi koostuu?</li> <li>♦ Miten luotettavuutta arvioidaan?</li> <li>♦ Mikä on tehdyn luotettavuusarvioinnin merkitys?</li> </ul>
7. Raportointi	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Onko raportointi uskottavaa ja linjassa saatujen tuloksien kanssa?</li> <li>♦ Pitävätkö raportin lukijat raportointia uskottavana?</li> </ul>

## Luku IV

### Kvanttifysiikan kurssi

Seuraavaksi esitetään *Modernia fysiikkaa opettajille* -kurssin suunnittelun teoreettiset lähtökohdat ja opetuksen lähestymistapa. Lisäksi tarkastellaan kurssin sisältöä siltä osin, kun on tarkoituksenmukaista tutkimustehtävän toteutumisen ymmärtämiseksi.

#### 4.1 Kurssin suunnittelun lähtökohdat

##### 4.1.1 Sisällön rajaaminen

Helsingin yliopiston fysikaalisten tieteiden laitoksella on opettajalinjan opintoihin jo useiden vuosien ajan kuulunut kurssi, jonka tavoitteena on vahvistaa opettajaopiskelijoiden kvanttifysiikan aiheiden ymmärrystä ja antaa valmiuksia niiden opettamiseen. Kurssin laajuus ja fysikaalinen sisältö on todettu tarkoituksenmukaiseksi, joten perustaltaan saman tyyppinen kurssi päätettiin sisällyttää myös Joensuun fysiikan laitoksen kurssitarjontaan. Lisäksi kurssin alkuun lisättiin mallien tarkastelua fysiikan ja fysiikan opetuksen näkökulmasta ja loppuun hieman hiukkasfysiikan perusteita. Kurssin keskeistä sisältöä kuvaa taulukko 4.1 (s. 65). Kurssin sisältö vastaa hyvin myös lukion modernin fysiikan kurssin kvanttifysiikan osa-alueen opetussuunnitelman sisältöä (Opetushallitus 2003). Kurssin suunnittelussa pyrittiin sovittamaan käsiteltävien aiheiden laajuus opettajien tarpeita vastaavaksi. Tutkimukseen liittyvää kurssin fysikaalista sisältöä kuvataan tarkemmin luvussa 4.3 (s. 70).

**Taulukko 4.1.** Modernia fysiikkaa opettajille -kurssin sisältö.

Kurssin sisältö
Mallit fysiikassa ja fysiikan opetuksessa
Kaasujen moolisten lämpökapasiteettien lämpötilariippuvuus
Mustan kappaleen säteily
Valosähköinen ilmiö
Comptonin ilmiö
Dualismi
Atomien spektrit ja atomimallit
Schrödingerin yhtälö ja Bornin tulkinta
Zeemanin ilmiö ja elektronin spin
Hiukkasfysiikan perusteita

#### 4.1.2 Opetuksen lähestymistapa

Opetuksen lähestymistavalla tarkoitetaan tietyn suunnitelman tai strategian noudattamista opetuksen tavoitteisiin pyrittäessä. Tiettyä lähestymistapaa noudattavan opetuksen sisällöt ja metodit muodostavat harkitun ja suunnitelmallisen kokonaisuuden. Lähestymistavan valinnan tulisi olla opettajan tietoinen didaktinen valinta, jossa hänen tulisi huomioida opetettavan aineksen, oppilaiden tason ja opetustavoitteiden lisäksi oma opetustyylinsä ja persoonallisuutensa. (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1998)

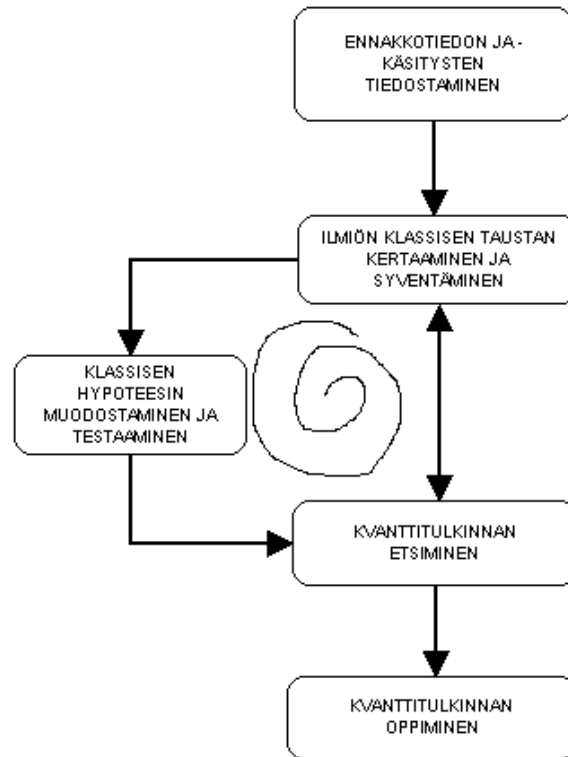
Tässä tutkimuksessa tarkasteltavalla kurssilla pääpaino on kvanttifysiikan syntyyn johtaneiden ilmiöiden tarkastelussa, joten sillä on samoja piirteitä empiiris-induktiivisen lähestymistavan kanssa (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1998). Kurssilla on myös mukana tieteen historiaa, koska historiallisten lähtökohtien tarkastelu tarjoaa oivan tavan ymmärtää tieteen käsitteitä ja prosesseja sekä on edellytys luonnontieteen luonteen ymmärtämiselle (Matthews 1994; Justi & Gilbert 2002). On myös esitetty, että tieteen historian integroiminen osaksi luonnontieteen opetusta auttaa oppijoita huomaamaan, että suuresti arvostetuilla ja älykkäillä tiedemiehillä on ollut samanlaisia käsityksiä kuin heillä, joten käsitykset eivät ole typeriä. Samalla oppijat myös ymmärtävät käsitysten historiallisuuden ja sen, että opetuksessa tavoiteltava käsitys on historiallista käsitystä arvokkaampi. (Monk & Osborne 1996) Täten historia voi myös edesauttaa käsitteellistä muutosta.

Kurssin alussa tarkastellaan mallien teoriaa kurssilla käsiteltävien mallien luonteen ymmärtämisen helpottamiseksi. Mallit ovat tärkeitä luonnontieteen oppimisen ja opettamisen työkaluja; ovathan ne myös luonnontieteen saavutuksia, ja mallintaminen on osa tieteellistä metodologiaa (Gilbert ym. 2000; Halloun 2004). Harrison (2001) perustelee mallintamisen käyttöä luonnontieteen opetuksessa sillä, että monet luonnontieteen oliot ovat abstrakteja ja aistein havaitsemattomia tai niiden selittäminen muutoin kuin analogiaa käyttäen ei ole mahdollista. Kvanttifysiikassa mallit kuvaavatkin usein abstrakteja käsitteitä ja olioita, jotka voidaan havaita vain epäsuorasti (Johnston ym. 1998; Mashhadi & Woolnough 1999). Kvanttifysiikka itsessään sisältää lukuisia malleja, joten mallien malliluonteen ymmärtäminen nousee erityisen tärkeään asemaan. Esimerkkeinä eritasoisista malleista mainittakoon Einsteinin vuonna 1905 esittämä valokvanttihiljenteille perustuva valon rakennesamalli (Pais 1982) ja Einsteinin 1916 tulkinta fotonista säteilykentän tilaa kuvaavana oliona (Pais 1982) sekä elektronin käyttäytymistä kuvaava de Broglie'n hypoteesille nojaava aineaaliteoria (de Broglie 1965) ja Bornin tulkinta (Born 1964).

Mallien merkitystä kvanttifysiikan oppimisessa ei ole tunnetusti tutkittu Eulerin ym. (1999) pilottitutkimusta lukuun ottamatta. Helsingin yliopiston fysiikan laitoksella suoritettua tutkimustyötä pohjalta näyttää kuitenkin siltä, että kvanttifysiikan opetuksessa hyvin keskeinen asema on selittävillä malleilla ja niiden episteemisen aseman ymmärtämisellä teorian kokonaisrakenteessa (Heikkinen 2005; Heikkinen & Koponen 2005). Tämän vuoksi mallien asema ja niiden konstruointi ovat opetuksen onnistumisen keskeisiä tekijöitä. Mallien ymmärtämisen ongelmiin voidaan pyrkiä vaikuttamaan käsittelemällä niitä korostetusti opetuksessa ja tekemällä eksplisiittiseksi niiden pätevyysalueet ja ominaisuudet (Duit 1991).

Oppijan hypoteettista, ymmärtämiseen tähtäävää, hermeneuttista oppimisprosessia esittää kuvio 4.1 (s. 67). Kurssin aikana oppijat analysoivat tiettyjen ilmiöiden kokeellisia tuloksia pyrkien ymmärtämään, miksi klassisen fysiikan teoriat ja mallit eivät pysty kattavasti selittämään tehtyjä havaintoja. Kokeellisista havainnoista liikkeelle lähtevä opetus voi tehdä kvanttifysiikan opiskelusta mielenkiintoisempaa ja helpommin omaksuttavampaa. Samalla oppijat joutuvat tarkastelemaan oman tietämyksensä syvyyttä ja laajuutta. (Asikainen 2003; Asikainen, Koponen & Hirvonen 2006b) Tämän tyyppisen menetelmän on todettu tekevän fysiikan oppimisesta mielekäästä (Steinberg ym. 1996; Wittmann ym. 2002).

Oppijan klassista hypoteesia testatessaan kohtaama ristiriita ei välttämättä tarkoita kognitiivista ristiriitaa, vaan ristiriitaa klassiseen fysiikan teoriaan pohjautuvan ennusteen ja kvantti-ilmiöiden kokeellisten tulosten välillä. Kurssin opetuksessa pikemminkin pyrittiin rakentamaan uutta tietoa oppijoiden aiemmalle, opetettavan tiedon kanssa ristiriidattomalle tiedolle.



**Kuvio 4.1.** Oppijan hypoteettinen oppimisprosessi.

Kurssia varten laadittiin luentomoniste ja tehtävämateriaalia. Koska tutkimuksen tavoitteena oli oppimisprosessien seuraaminen kurssin kuluessa, luento- ja kurssimateriaalia ei jaettu etukäteen. Kurssia ei haluttu sitoa mihinkään oppikirjaan, vaan opiskelijoita kehoitettiin tutustumaan eri oppikirjojen esityksiin sen sijaan, että he olisivat seuranneet vain yhtä oppikirjaa kurssin aikana. Kirjasidonnaisuus olisi myös vaikeuttanut valitun opetuksen lähestymistavan toteuttamista sellaisena kuin se oli suunniteltu. Kurssimateriaalin lähdeluettelo on löydettävissä liitteestä 6 (s. 254).

Vaikka kurssi tähtää kvantti-ilmiöiden käsitteelliseen hallintaan, kurssin sisällön teoreettinen hallinta on myös tärkeässä asemassa. Tavoitteena on, että oppija pystyy kuvaamaan kvanttifysiikan kehittymistä kokeellisen havaintojen kautta, pystyy selittämään tehdyt havainnot ja hallitsee niiden selittämiseen tarvittavan teorian.

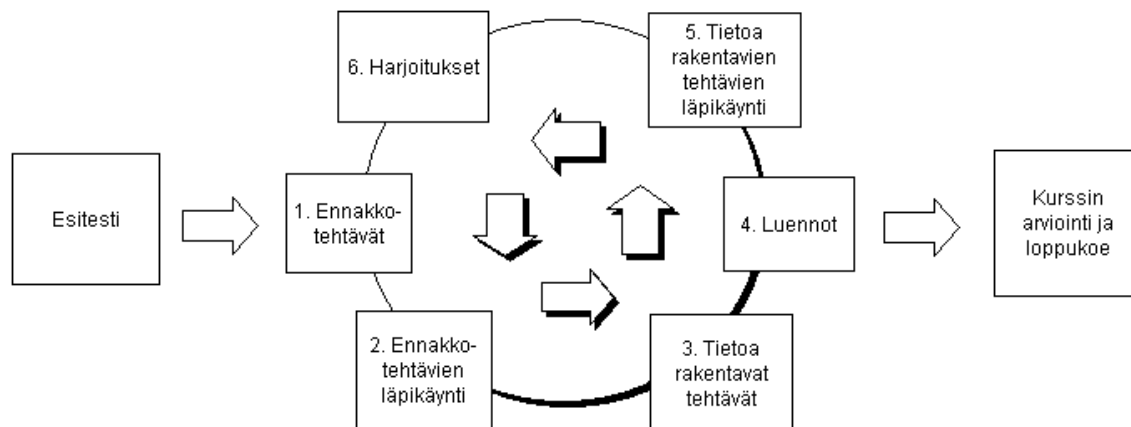
### 4.1.3 Opiskelumenetelmät

Perinteiset yliopisto-opetuksen muodot, jotka usein keskittyvät tiedon toistamiseen, esittämiseen ja hallintaan, voivat tuottaa inerttiä tietoa, jota oppijat eivät pysty soveltamaan työelämän monimutkaisissa ongelmissa (Tynjälä 1999). Tähän epäkohtaan pyrittiin puuttumaan suunnittelemalla kurssin opetus luvussa II esitettyjen käsitteiden muuttumista edistävän opetuksen periaatteiden mukaiseksi.

Opetus rakentuu eri tyyppisille tehtäville: taustatehtäville, luentotehtäville ja kotitehtäville (kuvio 4.2), ja se käynnistyy tarkasteltavan ilmiön klassisesta taustateoriasta. Oppijoiden ennakkotiedon esille tuomiseksi ja aktivoimiseksi käytetään ilmiöiden klassiseen taustaan liittyviä käsitteellisiä *taustatehtäviä*, joita oppijat pohtivat pareittain tai kolmissin ennen aiheen varsinaista opetusta. Taustatehtävät käsitellään opetuksessa samalla tarpeen mukaan tietoa syventäen.

Klassiseen taustateoriaan perehtymisen jälkeen siirrytään *luentotehtäviin*, jotka on suunniteltu tietoa rakentaviksi: tehtäviä pohtimalla ymmärrys tarkasteltavasta aiheesta kehittyy vaiheittain. Kurssilla käytettyjen luentotehtävien pohjana toimivat Helsingin fyysikaalisten tieteiden laitoksella kehitetyt kvalitatiiviset tehtävät (ks. Heikkinen 2005). Luentotehtävissä tarkastellaan ilmiöön liittyviä kokeellisia tuloksia, jotka pyritään selittämään muodostamalla klassisen fysiikan mukainen ennuste. Verrattaessa muodostettua ennustetta ja kokeellisia tuloksia toisiinsa päädytään ristiriitaan, jolloin syntyy tarve uudelle tulkinnalle.

*Kotitehtävissä* opiskeltuja asioita tarkastellaan käsitteellisten ja laskutehtävien avulla.



**Kuvio 4.2.** Opiskelumenetelmät kurssilla (mukaihen Asikainen 2005, Asikainen ym. 2006b).



## 4.2 Kurssin toteutus

Kurssi toteutettiin kahdesti. Ensimmäisen kurssin opiskelijoita olivat opettajaopiskelijat, ja se toteutettiin tavanomaisena kontaktiopetuksena. Luento- ja harjoitusten yhteenlaskettu tuntimäärä oli kuusi viikkotuntia kurssin kokonaiskeston ollessa 10 viikkoa. Kurssilla ei ollut perinteiseen tapaan luentoja ja niihin liittyviä viikoittaisia laskuharjoituksia, vaan kokonaisviikkotuntimäärä käytettiin tarpeen mukaan luento-opetukseen ja harjoituksiin. Kurssin tuntisuunnitelma löytyy liitteestä 7 (s. 255).

Toisen kurssin opiskelijat olivat fysiikan pätevyystutkintoon osallistuvia eri kouluasteilla toimivia matematiikan, fysiikan ja kemian opettajia. Kurssi toteutettiin monimuoto-opetuksena ja se koostui kuukausittaisesta kontaktiopetuksesta (2\*80min) sekä itsenäisesti tehtävistä etätehtävistä. Kurssin kokonaiskesto oli yhdeksän kuukautta, eli opetus jakautui huomattavasti pidemmälle aikavälille ensimmäiseen kurssiin verrattuna. Kurssin tuntisuunnitelma on esitetty liitteessä 8 (s. 256).

Sosiaalinen vuorovaikutus sekä opettajan ja opiskelijoiden välillä että opiskelijoiden välillä oli osa kurssin opetuksen lähestymistapaa (taulukko 4.2). Opiskelijoita rohkaistiin tekemään tehtäviä pareittain, mutta ne oli mahdollista tehdä myös itsenäisesti. Opiskelijoiden kurssin tapauksessa taustatehtävät tehtiin luento/harjoitusaikana, ja opettajien kurssilla taustatehtävät tehtiin kotona ennen aiheen opetusta.

**Taulukko 4.2.** Opiskelutavat opiskelijoiden ja opettajien kursseilla.

Opiskelutapa	Opiskelijoiden kurssi	Opettajien kurssi
Taustatehtävät	Pareittain tai kolmissin luento/harjoitusaikoina	Etätehtävinä lähiopetusjaksojen välillä itsenäisesti tai pareittain
Taustatehtävien läpikäynti ja taustateorian syventäminen	Pääosin keskusteleva opetus	Pääosin luento-opetus
Luentotehtävät	Pareittain tai kolmissin	Pareittain tai kolmissin
Luentotehtävien läpikäynti	Pääosin keskusteleva opetus	Pääosin keskusteleva opetus
Teorialuento	Pääosin luento-opetus	Pääosin luento-opetus
Kotitehtävät	Yksin tai pareittain	Yksin tai pareittain

Opetuksessa suositettiin vuorovaikutteista ja keskustelevaa opetustyyliä opettajajohtoisen luento-opetuksen asemasta pyrkien aktivoimaan osallistujia osallistumaan opetukseen. Ensimmäisen kurssin eli opiskelijoiden tapauksessa opetus muodostuikin aidosti vuorovaikutteiseksi, mutta opettajien kurssilla vuorovaikutus oli melko yksisuuntaista. Tausta- ja kotitehtävät käsiteltiin kurssilla valmiiden ratkaisupohjien avulla keskustellen ja luentotehtävät käsiteltiin pääsääntöisesti muistiinpanoja tekemällä.

Molemmilla kursseilla hyödynnettiin verkosta löytyvää valmista oppimateriaalia. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että osassa kotitehtäviä oppijat perehtyivät tiettyihin appletteihin tai oppimateriaalisivustoihin. Opettajat lisäksi palauttivat tausta- ja etätehtävät opettajien kurssilla käytössä olleen WebCT-ympäristön kautta. Kurssipohjan keskustelu- ja sähköpostitoimintoja käytettiin lisäksi kurssin viestinnässä.

### 4.3 Kurssin sisältö

*Modernia fysiikkaa opettajille* -kurssin opetuksen tavoitteena on, että oppija ymmärtää kvanttifysiikan ja klassisen fysiikan erot ja yhtäläisyydet. Yhtäläisyyksiä ovat esimerkiksi suureiden säilyminen (taulukko 4.3) ja klassisten käsitteiden käyttö kvanttifysiikan teorioissa. Eroja ja yhtäläisyyksiä korostetaan ristiriitauttamalla klassisen fysiikan tietoa kvantti-ilmiöiden kokeellisten havaintojen kanssa. Kurssin tavoitteena on myös, että oppija muodostaa prosessimallien avulla eksistenssiväitteitä olioiden ominaisuuksista eli ilmiöissä havaitut ominaisuudet tulkitaan olioiden ominaisuuksiksi.

**Taulukko 4.3.** Klassiset ja kvanttikäsitteet ja niiden suhde fysiikan lakien kahteen invarianssiominaisuuteen eli säilyviin suureisiin (mukailten Lévy-Leblond & Balibar 1990). Kolmas invarianssi rotaatio tilassa on jätetty tarkastelun ulkopuolelle.

Invarianssi	Aaltokäsitteet		Hiukkaskäsitteet	Kvanttikäsitteet
Siirtymä ajassa	Jaksonaika $T$	Värähtely $\nu = 2\pi / T$	Energia $E$	$E = h\nu$
Siirtymä tilassa	Aallonpituus $\lambda$	Aaltoilu $k = 2\pi / \lambda$	Liikemäärä $p$	$p = \hbar k$

Kurssin sisällön esittelyssä on tarkoituksenmukaista tarkastella opetuksen sisältöjä kokonaisvaltaisesti, koska kurssin opetus rakentui eri tyyppisten tehtävien varaan

luentomonisteen keskittyessä lähinnä fysikaalisen teorian esittelyyn. Kuvauksissa on pyritty jäsentämään eri aiheiden ympärille rakentuvia opetusjaksoja opetuksen tavoitteiden, tarkasteltavien ilmiöiden, kokeellisuuden sekä mallien, teorioiden ja lakien kautta. Kuvaus on kurssin sisällön tiivistelmä, eikä sitä sellaisenaan ole käytetty opetuksessa.

Seuraavaksi käsitellään kurssin opetusjaksot lähtien liikkeelle moolisen lämpökapasiteetin lämpötilariippuvuudesta päätyen Schrödingerin yhtälöön ja Bornin tulkintaan. Atomimallit, vetyatomin spektri, Zeemanin ilmiö ja hiukkasfysiikan perusteet on rajattu raportoinnin ulkopuolelle, koska ne eivät varsinaisesti liity tutkimustehtävään. Mallien merkitystä fysiikan opetuksessa tarkasteltiin jo luvussa 2.4 (s. 25)

#### 4.3.1 Moolisen lämpökapasiteetin lämpötilariippuvuus

##### **Opetusjakson tavoitteet**

- ♦ klassisen fysiikan tietojen kertaaminen/syventäminen
  - mitä ovat lämpö, lämpökapasiteetti, ominaislämpökapasiteetti ja moolinen lämpökapasiteetti
  - energian varastoituminen aineeseen sitä lämmitettäessä
  - energian tasanjakoperiaate
  - vapausasteen käsite
- ♦ klassinen ennuste mooliselle lämpökapasiteetille
- ♦ alkuaineiden moolisen lämpökapasiteetin arvoihin tutustuminen
- ♦ valmistava aihe kvanttiajatteluun vapausastemallin avulla

##### **Ilmiö**

Lämpökapasiteetti kuvaa aineen lämpötilan muutosta ainetta lämmitettäessä eli tuotaessa siihen energiaa. Määriteltäessä lämpökapasiteetti massayksikköä kohden on kyseessä ominaislämpökapasiteetti. Moolisella lämpökapasiteetilla puolestaan tarkoitetaan aineen lämpökapasiteettia ainemäärää kohti. Klassinen Dulongin ja Petitin laki ennusti, että moolinen lämpökapasiteetti on kaikille alkuaineille vakio. Avogadron, de la Riven ja muiden tutkijoiden saamat mittaustulokset olivat kuitenkin ristiriidassa lain antamien ennusteiden kanssa.

##### **Kokeelliset havainnot**

Moolisten lämpökapasiteettien tutkimuksen voidaan katsoa alkaneen ranskalaisten Petitin ja Dulongin vuonna 1819 tekemistä tutkimuksista. Tutkijat määrittivät eräiden metallien ja rikin moolisen lämpökapasiteetin arvon ja havaitsivat, että kaikkien

tutkittujen aineiden moolinen lämpökapasiteetti-arvo oli sama, noin  $6 \text{ cal}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{C})^{25}$ . Tutkijat uskoivat, että mittausjärjestelyjen parantuessa voitaisiin osoittaa tuloksen pätevän myös kaasuille ja muillekin kiinteille aineille. Melko pian kävi kuitenkin ilmi, ettei Dulongin ja Petitin kokeellinen laki ollutkaan niin yleispätevä kuin sen kehittäjät olivat ajatelleet sen olevan. Useat tutkijat, muun muassa Avogadro, de la Rive yhdessä Marquet:n kanssa, ja Regnault, saivat hiilen mooliselle lämpökapasiteetille Dulongin ja Petitin kokeellisesta laista poikkeavia tuloksia. Seuraavien kahdenkymmenen vuoden ajan löydettiin useita muitakin alkuaineita, joiden mooliset lämpökapasiteetit eivät noudattaneet lakia. (Pais 1982)

Nykytietämyksen mukaan yli puolella kiinteässä olomuodossa olevista alkuaineista<sup>26</sup> moolisen lämpökapasiteetin arvo on noin  $25 \text{ J}/(\text{Kmol})$  ja yksiatomisten kaasujen moolinen lämpökapasiteetti on  $28.8 \text{ J}/(\text{Kmol})$ . Suurimmalla osalla alkuaineista moolisen lämpökapasiteetin arvo sijoittuu välille  $22\text{-}32 \text{ J}/(\text{Kmol})$ . Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jos otetaan yksi mooli mitä tahansa alkuainetta, tarvitaan noin  $25 \text{ J}$  energiaa nostamaan sen lämpötilaa yhden kelvinasteen verran riippumatta alkuaineen kiderakenteesta tai sidostyypistä. Kaksi- tai useampiatomisten kaasujen sekä joidenkin kiinteiden aineiden tapauksessa moolinen lämpökapasiteetti osoittautuu kuitenkin lämpötilasta riippuvaksi suureeksi. Lämpötilan noustessa moolisen lämpökapasiteetin arvo kasvaa, ja lämpötilan laskiessa vastaavasti pienenee. Myös eräillä kiinteillä metalleilla, kuten kullalla, kuparilla ja hopealla moolisten lämpökapasiteettien arvot pienyvät lämpötila laskiessa alle huoneenlämpötilan. (ks. esimerkiksi de Podesta 1996)

## **Mallit, lait ja teorit**

### ♦ Klassinen vapausastemalli

Mekaniikassa vapausasteen käsite liittyy kappaleen liikkeen tarkasteluun. Kappaleen liike voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiseen liikkeeseen: etenemiseen, värähtelyyn ja pyörimiseen. Kutakin eri liiketyyppejä vastaavat omat vapausasteensa.

Vapausasteet voidaan myös ymmärtää energian sitoutumisen tiloiksi. Rakennosamallissa kiinteän aineen atomilla on kolme etenemisen vapausastetta, joten energia voi sitoutua kolmelle etenemisliikkeen vapausasteelle. Sidoksilla toisiin atomeihin liittyneellä atomilla on lisäksi kolme värähtelyn vapausastetta. Vapausasteita on siis yhteensä 6. Vastaavasti yksiatomisella kaasulla on 3 vapausastetta ja kaksiatomisella kaasumolekyylillä 8. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004)

### ♦ Klassinen Dulongin ja Petitin laki

Klassisen Dulongin ja Petitin lain teoreettisen muodon loi Boltzmann vuonna 1876. Klassisen tilastollisen mekaniikan energian tasajakoperiaatteen yksinkertaisin muoto oli

---

<sup>25</sup> Eli noin  $25 \text{ J}/\text{Kmol}$ .

<sup>26</sup> NTP-olosuhteissa eli kun  $T = 20^\circ\text{C}$  ja  $p = 1 \text{ atm}$ .

tunnettu jo vuodesta 1860 lähtien. Sen mukaan lämpötilassa  $T$  olevassa systeemissä energia (eli sisäenergia) jakautuu tasan vapausasteille siten, että kunkin vapausasteen keskimääräinen energia on  $\frac{1}{2} k_B T$ , missä  $k_B$  on vakio<sup>27</sup>. Boltzmann esitti Dulong-Petit lain seuraavassa muodossa:

$$C_{V,m} = 3R \quad (4.1)$$

missä  $R$  on kaasuvakio<sup>28</sup>. Eräiden kiinteiden aineiden poikkeavat arvot Boltzmann selitti siten, että lämpötilan laskiessa vierekkäiset atomit tarttuvat toisiinsa, jolloin kyseiset vapausasteet eivät osallistu energianvaihtoon. Tämä selitysmalli ei kuitenkaan vaikuttanut järkevältä kaasujen tapauksessa. (Pais 1982)

Kelvin puolestaan uskoi, että klassinen tasajakoperiaate oli väärässä. Hän pysyi kannassaan vaikka ei pystynyt löytämään virhettä teoriasta. Luennossaan vuonna 1900 hän totesi, että yksinkertaisin keino päästä eroon vaikeuksista olisi hylätä Boltzmannin teoria. (Pais 1982)

♦ Lämpötilariippuvuuden selittäminen vapausastemallin avulla

Aineen moolisen lämpökapasiteetin vahvaa lämpötilariippuvuutta esitti ensimmäisenä Weber 1870-luvulla analysoituaan muiden tutkijoiden saamia tuloksia. Hän havaitsi, että moolisten lämpökapasiteettien arvot lähestyivät Dulong-Petit lakia korkeissa lämpötiloissa. (Pais 1982)

Moolisen lämpökapasiteetin lämpötilariippuvuus voidaan selittää vapausastemallin avulla. Etenemisliikkeen vapausasteet voivat varastoida energiaa jatkuvasti, mutta pyörimisen ja värähtelyn vapausasteet tulevat mukaan energian varastointiin vasta tietyn kynnsarvon ylittyessä. Vastaavasti lämpötilan laskiessa energialtaan suuret vapausasteet jäävät pois käytöstä ja aineen moolisen lämpökapasiteetin arvo pienenee.

Vapausastemallissa täten vain tietyt muutokset ovat mahdollisia. Vapausastemalli luo pohjaa tilan käsitteen ja tilan muutosten ymmärtämiselle. Nämä ovat keskeisessä asemassa kvanttifysiikan formalismiin siirryttäessä.

---

<sup>27</sup> Nykyisin vakio tunnetaan Boltzmannin vakiona.

<sup>28</sup>  $R = 8.32441 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

### 4.3.2 Mustan kappaleen säteily

#### **Opetusjakson oppimistavoitteet**

- ♦ klassisen fysiikan tietojen kertaaminen/syventäminen:
  - fysiikan perusoliot
  - sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismit
  - aineen ja säteilyn vuorovaikutusprosessit
  - klassiset säteilylait
- ♦ klassinen ennuste mustan kappaleen säteilylaille
- ♦ seisovan aaltoliikkeen syntyminen onkalon sisälle
- ♦ mustan kappaleen ja mustan kappaleen säteilyn käsitteiden merkitys
- ♦ materian ja säteilykentän välisen vuorovaikutuksen tarkastelu
- ♦ Planckin kvanttihypoteesi ja Einsteinin valokvanttihypoteesi

#### **Ilmiö**

Mustaa kappaletta voidaan mallintaa ontolla metallipallolla, johon on tehty reikä säteilyn havainnointia varten. Palloa lämmitettäessä sen varaukselliset rakenneosat synnyttävät onkaloon sähkömagneettista säteilyä, joka absorboituu onkalon varauksellisten rakenneosien liikkeeseen. Näin onkaloon syntyy seisova aaltoliike, jolloin musta kappale ja sen sisällä oleva säteily ovat termodynaamisessa tasapainossa. Tällöin havainnoimalla onkalon sisällä olevaa säteilyä saadaan mustan kappaleen säteilylle ominainen säteilyspektri. Spektrin muodon selittämiseksi on oletettava, että metallin materiaaliset värähtelijät voivat absorboida ja emittoida energiaa vain tietyn suuruusina annoksina, kvantteina. (ks. esimerkiksi Maalampi & Perko 2002; Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994)

#### **Kokeelliset havainnot**

Mustan kappaleen emittoiman säteilyn energia riippuu mustan kappaleen lämpötilasta mutta ei sen sisäisestä rakenteesta. Mustan kappaleen spektrillä on kuitenkin aina sille tunnusomainen muoto. Lämpötilan kohotessa suurinta energiatiheyttä vastaava aallonpituus pienenee. Tämä ilmiö voidaan havaita tarkasteltaessa hehkuvan kuumaksi kuumennettua metallikappaletta, jonka väri muuttuu punahehkuisesta keltahehkuisen kautta sinihehkuiseksi. Auringon, tähtien ja mustien aukkojen säteily noudattaa mustan kappaleen säteilylakia. (ks. esimerkiksi Maalampi & Perko 2002; Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994)

### Mallit, lait ja teoriat

- ♦ Seisovan aaltoliikkeen muodostuminen onkalon sisälle

Tarkastellaan metallipalloa, jota lämmitetään. Energian lisäys lisää metallipallon rakenneosien lämpöliikettä. Onkalon värähtelevät rakenneosat emittoivat sähkömagneettista säteilyä onkaloon ja sinne syntyy sähkömagneettisia aaltoja. Osuessaan pallon sisäpintaan aallot saavat metallipallon rakenneosat värähtelemään, jotka toimivat edelleen uuden säteilyn lähteinä. Metallipallo, joka on lämpötasapainossa sisällään olevan säteilyn kanssa vastaanottaa ja luovuttaa energiaa yhtä paljon aikayksikössä. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004)

- ♦ Kentän vapausasteet

Myös sähkömagneettista kenttää ja sen vuorovaikutuksia voidaan selittää vapausastemallin avulla. Kentän vapausasteiksi oletetaan tässä tarkastelussa sen taajuudet siten, että kukin taajuus on oma vapausasteensa.

- ♦ Kirchhoffin säteilylaki

Mustan kappaleen teorian kehittämisen voidaan katsoa alkaneen Kirchhoffin työstä vuosina 1824-1887. Kirchhoffin esitti vuonna 1859, että energian emission ja absorptioon suhteelle pätee:

$$\Phi(\lambda, T) = \left( \frac{e}{a} \right)_\lambda \quad (4.2)$$

missä  $e$  on kappaleen emissioteho ja  $a$  on absorptioteho. Kirchhoffin mukaan suhde  $e/a$  on sama kaikille kappaleille, mikäli niiden lämpötilat ovat samat. Kirchhoff korosti funktion määrittämisen tärkeyttä. Kappaletta, joka absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn Kirchhoff kutsui mustaksi kappaleeksi. (Mehra & Rechenberg 1982)

- ♦ Stefan-Boltzmannin laki

Josef Stefan esitti vuonna 1879 yhteyttä mustan kappaleen säteilyn kokonaisenergiatiheyden ja onkalon lämpötilan välille:

$$\rho = AT^4 \quad (4.3)$$

missä  $\rho$  on säteilytiheys ja  $A = 7.566 \cdot 10^{-16} \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-4}$ . Kirjallisuudessa tulos tunnetaan Stefan-Boltzmannin lakina. (Kuhn 1987)

♦ Wienin siirtymälaki

Wienin vuonna 1896 esittämä lakia kutsutaan Wienin siirtymäläksi, koska se kuvaa säteilyn energiatiheyden kuvaajan huipun siirtymistä onkalon lämpötilan muuttuessa

$$\rho_\lambda = \frac{4\pi}{c} J_\lambda = \lambda^{-5} \varphi(\lambda T) \quad (4.4)$$

missä  $\varphi$  on mielivaltainen, yhdestä muuttujasta riippuva funktio. Huolimatta siitä, että funktio  $\varphi$  oli edelleen arvoitus, Wienin työn oli merkittävää, koska nyt kyseinen funktio riippui vain yhdestä muuttujasta, ei kahdesta. Myöhemmin Wien tutustuttuaan Maxwell-Boltzmann statistiikkaan esitti siirtymälaille uuden muodon tietävästi vuonna 1895:

$$J_\lambda = b\lambda^{-5} e^{-a/\lambda T} \quad (4.5)$$

Wienin laki noudattaa hyvin kokeellisia tuloksia pienillä aallonpituuksilla, mutta ei aallonpituuden kasvaessa. Lain antamille tuloksille saatiin sekä sitä puoltavia (Paschen) että ristiriitaisia (Lummer & Pringsheim ja Rubens & Kurlbaum) tuloksia. (Kuhn 1987)

♦ Klassisen fysiikan ennuste: Rayleigh-Jeans laki

Energian tasanjakoperiaattele ja mustan kappaleen sisälle muodostuvan säteilykentän vapausasteiden lukumäärälle perustuvaa Rayleigh-Jeans lakia voidaan tarkastella kvalitatiivisesti.

Energian tasanjakoperiaatteen mukaan jokaisen vapausasteen energia on  $\frac{1}{2}kT$ . Jos kentän jokainen taajuus on oma vapausasteensa, kentässä on ääretön määrä vapausasteita, koska taajuus voi saada kaikkia mahdollisia arvoja. Täten kentän lämpökapasiteetin pitäisi olla äärettömän suuri: sen pitäisi siis pystyä absorboimaan energiaa rajattomasti. Tällöin kentän olisi mahdotonta saavuttaa lämpötasapaino materian kanssa, joten myös sen lämpötilan määrittely olisi mahdotonta. (Mehra & Rechenberg 1982)

Mainituille lähtökohdille perustuva Rayleighin ja Jeansin johtama laki on seuraava,

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \quad (4.6)$$



Rayleighin ja Jeansin lain antamat tulokset ovat lähellä kokeellisia tuloksia suurilla aallonpituuden arvoilla. Aallonpituuden lyhetessä sen mukainen energiatiheys kasvaa äärettömän suureksi. Tämä tulos tunnetaan ultraviolettikatastrofina<sup>29</sup>.

♦ Planckin säteilylaki

Planckin teoria perustui Maxwellin kenttäteoriaan, termodynamiikkaan ja Boltzmannin statistiikkaan. Hän oletti, että säteilykentän synnyttävät resonaattorit eli lineaariset värähtelevät sähköiset dipolit (oskillaattorit), joita voidaan tarkastella mekaanisena systeeminä, jonka tilojen jakauman määrää Boltzmannin tilastollinen teoria. Systeemin kokonaisenergia  $U_N = P\varepsilon$ , missä  $P$  on energiatilojen<sup>30</sup> lukumäärä. Säteilylaki on ymmärrettävissä, mikäli energian ja taajuuden välillä on voimassa yhteys

$$\varepsilon = h\nu, \quad (4.7)$$

missä  $h$  on vakio, jota Planck itse kutsui vaikutuskvantiksi<sup>31</sup> tai vaikutustekijäksi<sup>32</sup>. Planckin tarkastelussa säteily- ja vuorovaikutusprosessit ovat klassisia ja värähtelijät emittoivat säteilyä jatkuvasti. Vain energian ja taajuuden välinen yhteys on ei-klassinen. (Pais 1982) Kuhnin (1987) mukaan Planckin näkemys säteilyteoriasta säilyi klassisena ainakin vuoteen 1906 saakka.

Planckin säteilylaki kuuluu seuraavasti:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (4.8)$$

Oppikirjoissa Planckin tekemä oletus energian ja taajuuden välisestä yhteydestä tunnetaan Planckin kvanttihypoteesina ja se kuuluu seuraavasti: värähtelijä, jonka taajuus on  $f$ , voi luovuttaa ja vastaanottaa sähkömagneettisen säteilyn energiaa vain kvanteissa,  $E = hf$ , missä  $h$  on Planckin vakio (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994). Tämä voidaan tulkita siten, että vapausasteen energia ei siis muutu jatkuvasti keskimääräisen arvon ollessa  $kT$ , vaan se on tietyn energiakvantin monikerta. (Pais 1982)

---

<sup>29</sup> Nimi tulee siitä, että energian arvot lähestyvät ääretöntä juuri ultraviolettiaallonpituusalueella.

<sup>30</sup> Eli vapausasteiden lukumäärä.

<sup>31</sup> Engl. quantum of action

<sup>32</sup> Engl. element of action

### 4.3.3 Valosähköinen ilmiö

#### Opetusjakson oppimistavoitteet

- ♦ klassinen tausta
  - säteilykentän energiatiheys
  - elektronikäsitys 1900-luvun vaihteessa
- ♦ energian säilymlakiin perustuva ilmiön tarkastelu
- ♦ valokvanttihankeesi
- ♦ elektronin ja fotonin vuorovaikutustapahtuman hetkellisyys ja paikallisuus säteilykentän ja materian välisessä vuorovaikutuksessa
- ♦ energian kvantittuminen vuorovaikutuksessa

#### Ilmiö

Ilmiötä, jossa sähkömagneettinen säteily saa aikaan elektronien irtoamisen metallista kutsutaan valosähköiseksi ilmiöksi. Ilmiötä voidaan tutkia kohdistamalla monokromaattista säteilyä purkausputken metallikohtioon. Elektronien emittoituminen aiheuttaa virtapiiriin sähkövirran, joka voidaan mitata purkausputken kohtioden välisen jännitteen funktiona (ks. esimerkiksi Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994).

Ilmiön havaitsi ensimmäisenä saksalainen Hertz vuonna 1887, mutta sitä alettiin kutsua valosähköiseksi ilmiöksi vasta kymmenen vuotta myöhemmin sen jälkeen kun Thomson oli ”löytänyt” elektronin ja kokeellisesti vahvistanut Hertzin tulokset. (Mehra & Rechenberg 1982)

#### Kokeelliset havainnot

Vuonna 1888 Hallwachs toisti Hertzin kokeen ja havaitsi, että metallipinta saa positiivisen varauksen ultraviolettisäteilyllä säteilytettäessä. Tämän jälkeen vuonna 1899 J. J. Thomson ja Lenard osoittivat toisistaan riippumattomasti, että ilmiö johtuu siitä, että negatiivisesti varautuneita hiukkasia emittoitui metallin pinnasta. (Mehra & Rechenberg 1982) Thomson määrittäi suhteen  $e/m$  valolla tuotetuista hiukkasista. Suhde osoittautui samaksi kuin katodisäteiden<sup>33</sup> tapauksessa. (Pais 1982) Tutkijat kutsuivat näitä ioneja irrotustapansa mukaan fotoelektroneiksi, koska he eivät olleet varmoja siitä, ovatko valosähköisessä ilmiössä havaitut elektronit ”tavanomaisia” elektroneja. (ks. esimerkiksi Caro, McDonell & Spicer 1978)

Lenard jatkoi valosähköisen ilmiön tutkimista ja raportoi pian uusista tärkeistä löydöistä: 1) elektronien irtoaminen tietyistä metallista tapahtuu vain tietyillä säteilyn taajuuksilla ja 2) säteilyn intensiteetti ei vaikuta emittoituvien elektronien nopeuksiin. (Mehra & Rechenberg 1982) Ensimmäinen havainto tarkoitti sitä, että elektronien

---

<sup>33</sup> J.J. Thomson ja Pieter Zeeman määrittivät suhteen  $e/m$  toisistaan riippumattomasti ja eri menetelmiä käyttäen vuonna 1897.

emissio alkaa kun säteilyn taajuus on suurempi kuin tarkasteltavalle metallille ominainen kynnystaajuus. Vastaavasti toinen havainto osoitti, ettei intensiteetiltään voimakas säteily aiheuta elektronien emissiota jollei kynnystaajuus ylitä. Vastaavasti pieni-intensiteettinen säteily aikaansaa valosähköisen ilmiön kynnystaajuuden ylittyessä. Muut tutkijat havaitsivat lisäksi, että 3) elektronien emissio alkaa heti säteilyn osuessa metallipintaan, 4) emittoituvien elektronien lukumäärä aikayksikössä on verrannollinen säteilyn intensiteettiin, 5) elektronien virta saadaan lakkaamaan ( $i = 0$ ) tietyllä pysäytysjännitteen  $V_0$  arvolla, 6) pysäytysjännitteen suuruus riippuu valon taajuudesta, mutta ei riipu valon intensiteetistä ja 7) emittoituneiden elektronien liike-energiat saavat kaikkia mahdollisia arvoja nollan ja maksimiarvon välillä. Liike-energian maksimiarvo on verrannollinen valon taajuuteen. (ks. esimerkiksi Blatt 1992)

Tehdyt havainnot olivat yllättäviä eikä niitä pystytty selittämään klassisen teorian pohjalta. Einstein kommentoi vuonna 1905 Lenardin havaintoja seuraavasti: ”Ajattelutapa, jonka mukaan etenevän valon energia on jatkuvasti jakautunut tilaan jossa valo etenee, kohtaa erityisen suuria vaikeuksia, kun sen avulla yritetään selittää valosähköistä ilmiötä.” (Pais 1982)

### **Mallit, lait ja teorit**

- ♦ Klassinen ennuste valosähköiselle ilmiölle

Klassisen mallin mukaan metallissa on lähes vapaasti liikkuvia elektroneja, joiden irrottamiseen tarvitaan tietty irrotustyö  $W$ . Sähkömagneettinen aaltoliike kuljettaa energiaa tuoden sitä metallin pintaan jatkuvana virtana. Energia etenee nopeudella  $c$  ja se on jakautunut säteilykentän energiatiheydeksi  $w_E$ , joten säteilyn intensiteetille voidaan kirjoittaa lauseke

$$I = w_E c . \quad (4.9)$$

Klassisesti energian absorboitumisnopeus metalliin on siten verrannollinen metalliin kohdistuvan säteilyn intensiteettiin. Säteilyn vaikutuksesta elektroni alkaa värähdellä ja ”kerää” näin säteilyn energiaa. Elektronin irtoaminen tapahtuu, kun elektronin värähtely on riittävän voimakasta eli energiaa on irrotustyön  $W$  verran. (ks. esimerkiksi Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994; Caro ym. 1978)

Klassisen mallin perusteella voidaan tehdä seuraavat ennusteet: 1) irtoavien elektronien lukumäärä aikayksikössä on verrannollinen säteilyn intensiteettiin, 2) elektronien irtoaminen tapahtuu viiveellä, joka on sitä pidempi, mitä pienempi on säteilyn intensiteetti, 3) irtoavien elektronien liike-energiat ovat hyvin pieniä ja 4) ilmiö ei riipu säteilyn aallonpituudesta tai taajuudesta. Verrattaessa näitä ennusteita Lenardin ja muiden kokeellisiin havaintoihin voidaan todeta, että vain ensimmäinen on oikea

muiden osoittautuessa ristiriitaisiksi kokeellisten havaintojen kanssa. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004)

♦ Einsteinin tulkinta

Einstein esitti vuonna 1905 valosähköiselle ilmiölle valokvanttiteorialle perustuvan tulkinnan. Valokvanttiteorian mukaan monokromaattinen valo koostuu vuorovaikuttamattomista kvanteista, joista kukin luovuttaa kaiken energiansa yksittäiselle elektronille muista valokvanteista riippumattomasti. Elektronien sidosenergian suuruudet vaihtelevat, joten myös irronneiden elektronien liike-energioiden suuruudet vaihtelevat. Elektronien suurinta liike-energiaa kuvaa relaatio

$$E_{\max} = h\nu - W_0, \quad (4.10)$$

missä  $\nu$  on tulevan säteilyn taajuus ja  $W_0$  on irrotustyö eli elektronien pienin sidosenergia metallista.

Einstein korosti, että yhtälö selittää Lenardin havainnot valon intensiteetin ja elektronin energian riippumattomuudesta. Einsteinin yhtälö (4.10) teki uusia ennusteita:

- ♦ energia ja taajuus ovat verrannollisia toisiinsa.
- ♦  $(E, \nu)$  -kuvaajan kulmakerroin on vakio ja riippumaton kokeessa käytettävästä materiaalista.
- ♦ kulmakertoimen arvo on Planckin vakion arvo. (Pais 1982)

Vuoteen 1909 mennessä oli tehty useita kokeita elektronin maksimienergian taajuusriippuvuuden vahvistamiseksi, mutta ehdottomia johtopäätelmiä tulosten perusteella ei voitu vielä tehdä. Yhdysvaltalainen Millikan oli tutkinut kyseistä ongelmaa jo useiden vuosien ajan tavoitteenaan osoittaa Einsteinin yhtälö vääräksi. Huhtikuussa 1914 hän raportoi, että Einsteinin yhtälö pätee erinomaisesti ja Planckin vakion arvo on  $6.57 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$  0,5% tarkkuudella<sup>34</sup>. (Millikan 1916; 1965; Pais 1982)

Vuonna 1905 Einstein siis tulkitsi energiakvantit säteilykentän rakenneosiksi, mutta vuonna 1916 hän täsmensi, että valokvantti kuvaa säteilykentän tilaa ja kvantittuminen liittyy säteilykentän ja materian väliseen vuorovaikutustapahtumaan. (Pais 1982) Einsteinin vuoden 1916 käsitys toimii modernin fotonikäsitteen perustana (Kidd, Ardini & Anton 1989).

---

<sup>34</sup> Nykyinen arvo on  $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ .

#### 4.3.4 Comptonin ilmiö

##### **Opetusjakson oppimistavoitteet**

- ♦ klassisten tietojen kertaaminen /syventäminen
  - Thomsonin sironta
  - mekaniikan kimmoisan törmäyksen malli
- ♦ fotonin liikemäärän ilmeneminen Comptonin ilmiössä

##### **Ilmiö**

Amerikkalainen Compton tutki kokeellisesti sähkömagneettisen säteilyn sironnan kulmariippuvuutta. Ilmiössä monokromaattinen röntgensäteily siroaa elektronista siten, että sirontaspektriin muodostuu alkuperäisen aallonpituuden lisäksi toinen huippu alkuperäistä pidemmällä aallonpituudella. Sirontakulman kasvaessa huippujen aallonpituusero suurenee. Comptonin ilmiö osoittaa, että fotonin ominaisuudeksi voidaan energian lisäksi liittää myös suuntautunut liikemäärä. (Compton 1923; 1965)

##### **Mallit, lait ja teoriat**

- ♦ Klassinen ennuste

Sironta on ilmiö, jossa sähkömagneettinen säteilyn etenemissuunta muuttuu väliaineen vaikutuksesta. Sironta tapahtuu siis väliaineessa, eikä aineen rajapinnassa, kuten heijastuminen ja taittuminen. Klassinen sironta voidaan ymmärtää säteilykentän ja elektronien välisenä vuorovaikutustapahtumana. Värähtelevä sähkökenttä vuorovaikuttaa elektronin kanssa ja saa sen värähtelemään. Värähtelevä elektroni toimii edelleen uuden säteilyn lähteenä taajuuden pysyessä muuttumattoma. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004)

Compton yritti selittää havaintonsa klassisen teorian avulla. Hän teki laskelmia, jotka perustuivat erilaisille elektronin malleille. Vaihtoehtoisena selityksenä hän esitti, että ilmiössä havaitaan kahdentyypisiä elektroneja. Hän ei pitänyt mahdollisena, että säteilyn taajuus voisi muuttua sirontaprosessissa ja hän epäili kyseessä olevan uudenlaisen fluoresenssisäteilyn lajin. (Mehra & Rechenberg 1982)

- ♦ Comptonin teoria

Compton yritti sinnikkäästi löytää ratkaisua havaitsemansa ilmiön selittämiseksi. Vuonna 1922 hän huomautti, että on olemassa kaksi erilaista säteilyteoriaa: klassiseen sähkömagneettiseen aaltoteoriaan perustuva ja säteilyn kvanttikäsitys, ”quantum conception of radiation”. Tuolloin hän oli kuitenkin vielä sinnikkäästi klassisen teorian kannalla. Vuotta myöhemmin hän kuitenkin hylkäsi röntgensironnan klassisen sähkömagnetismin teorian valokvanttiteorian kustannuksella. Sironnan

kvanttihypoteesin avulla voitiin selittää kaikki ilmiöön liittyvät poikkeavuudet klassisesta sironnasta. (Mehra & Rechenberg 1982)

♦ Ilmiön matemaattinen tarkastelu

Comptonin sirontatapahtuman matemaattisessa tarkastelussa elektronin ja sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutukseen käytetään mekaniikan kimmoisan törmäyksen mallia, jossa ovat voimassa sekä energian että liikemäärän säilymislait. Tarkastelussa on kuitenkin huomioitava, että sironnassa syntyy alkuperäisen aallonpituuden lisäksi toinen aallonpituus. Sähkömagneettinen säteily siis saa elektronin värähtelemään, mutta koska elektronin sirottama säteily poikkeaa alkuperäisestä säteilystä, vuorovaikutuksessa tulee olla jokin muu tekijä: osa elektronin säteilystä absorboimasta energiasta muuntuu elektronin liike-energiaksi. Mallissa on siis kolme osapuolta: törmäävä fotoni, alussa levossa oleva elektroni, joka saa liike-energiaa törmäyksessä ja siroava fotoni. Comptonin sirontakaava voidaan johtaa kirjoittamalla törmäystapahtumalle energian ja liikemäärän säilymislait ja huomioimalla, että elektronin liikemäärälle tulee käyttää suhteellisuusteorian mukaista lauseketta. (Compton 1923; 1961; 1965)

Comptonin sirontakaavan mukaan sironneen säteilyn aallonpituuden kasvu ei riipu tulevan säteilyn aallonpituudesta:

$$(\lambda_{\theta} - \lambda_0) = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta), \quad (4.11)$$

missä  $\lambda_{\theta}$  on tulevan säteilyn aallonpituus ja  $\lambda_0$  sironneen säteilyn aallonpituus. Tätä mallia myös Compton itse käytti havaitsemansa ilmiön selittämiseen. Malli kuitenkin nojaa historialliselle Eisteinin valokvanttihypoteesille, jonka mukaan valo tai sähkömagneettinen säteily koostuu hiukkasmaisista fotoneista (Pais 1982). Mallissa ei myöskään huomioida fotonin ja elektronin vuorovaikutuksen luonnetta, jossa energiansiirto on kvantittunutta. Fotoni luovuttaa aina kaiken energiansa elektronille, ei koskaan vain osaa siitä.

♦ Comptonin ilmiön verifiointi

Tutkijat saivat ristiriitaisia tuloksia yrittäessään verifioida Comptonin esittämän teorian. Kiista Comptonin ilmiöstä jatkui aina vuoden 1924 joulukuuhun saakka, jolloin Duane yhdessä kollegansa Allisonin kanssa sai kokeessa samanlaiset tulokset kuin Compton. Tuolloin ilmiö oli jo yleisesti hyväksytty fyysikoiden keskuudessa, ilmeisesti osasyys tähän oli jo olemassa oleva teoria. (Mehra & Rechenberg 1982)

#### 4.3.5 Dualismi

##### **Mallit, lait ja teorit**

- ♦ de Broglien hypoteesi

1920-luvun alussa ranskalainen fyysikko ja aatelismies, prinssi Louis de Broglie valmisteli kvanttiteoriaa käsittelevää väitöskirjaa. Hän pohdiskeli, miksi valon käyttäytymistä kuvaamaan tarvitaan kaksi teoriaa, hiukkasteoria ja aaltoteoria, ja miksi kahden teorian tarpeen ymmärtäminen on ongelmallista. Hän päätyi kahteen johtopäätökseen, jotka tunnetaan de Broglien hypoteeseina.

**Hypoteesi 1.** Valokvanttiteoria määrittelee valokvantin energian lausekkeella  $E = h\nu$ . Lauseke sisältää taajuuden  $\nu$ , joten teoriaa ei voida pitää tyydyttävänä, koska puhdasoppinen hiukkasteoria ei voi sisältää elementtejä, joissa esiintyy taajuus, koska taajuus on aalto-ominaisuus.

**Hypoteesi 2.** Elektronien stationaaristen tilojen määräämiseen liittyy kokonaislukuja. Elektroneja ei voida siis pitää [klassisina] hiukkasina.

Näiden kahden johtopäätöksensä perusteella de Broglie päätyi yleiseen tulokseen, joka ohjasi hänen tutkimuksiaan: kaikille luonnon perusolioille, sekä materiaalille että sähkömagneettiselle säteilylle, erityisesti valolle, on käytettävä hiukkas- ja aaltokäsitteitä samanaikaisesti. (de Broglie 1965) De Broglie esitti valon aalto-ominaisuuksia ja hiukkasominaisuuksia kuvaavien suureiden välille yhteyttä:

$$E = h\nu \quad \text{ja} \quad p = \frac{h}{\lambda}. \quad (4.12)$$

Tulos pätee kaikille massallisille hiukkasiin ja myöhemmin se johdettiin myös kvanttimekaniikasta. Näitä yhtälöitä kutsutaan de Broglien yhtälöiksi ja aallonpituutta de Broglien aallonpituudeksi. (ks. esimerkiksi Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994)

De Broglien teoria sai melko huonon vastaanoton osaksi ehkä siksi, että ranskalainen teoreettinen fysiikka oli tuolloin huonossa maineessa. Lisäksi Ranskalla oli virallinen boikotti Saksan fysiikkaa kohtaan. Einstein kuitenkin sovelsi joitakin de Broglien ajatuksia Bosen ja Einsteinin statistiikassa. Myös Schrödinger tunsu de Broglien hypoteesit. (Pais 1982)

- ♦ Heisenbergin epätarkkuusperiaate

Heisenberg esitti epätarkkuusperiaatensa vuonna 1927. Periaatteen sisältöä pohtivat monet kvanttifysiikot, esimerkiksi Pauli kommentoi sitä kirjeessään Heisenbergille: *”Ensimmäinen kysymys kuuluu, miksi vain suure  $p$ , eikä sekä suureet  $p$  ja  $q$ , voidaan kuvata mielivaltaisen tarkasti. Maailmaa voidaan katsoa  $p$ -silmin ja sitä voidaan katsoa*

*q-silmin, mutta jos molemmat silmät avataan samanaikaisesti, toinen hämärtyy.”* (Kragh 2002)

Heisenberg oli Paulin kanssa samaa mieltä: *”on merkityksetöntä puhua kiinteällä nopeudella liikkuvan objektin paikasta. Epätasemmisen paikan ja nopeuden hyväksymisellä on kuitenkin merkitys.”* (Kragh 2002)

Heisenberg osoitti, että hiukkasen paikan pienin epätarkkuus liittyy hiukkasen liikemäärän epätarkkuuteen lausekkeessa

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar / 2 \quad (4.13)$$

ja vastaavasti energian ja ajan epätarkkuus

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar / 2 \quad (4.14)$$

missä  $\hbar = h / 2\pi$ . Monet fyysikot innostuivat Heisenbergin epäyhtälöistä yrittäen muuntaa ja laajentaa niitä. Vuonna 1929 Robertson todisti epätarkkuusyhtälöiden yleisimmän muodon, joka oli voimassa kaikille konjugoiduille muuttujapareille<sup>35</sup>. Useimmat fyysikot Heisenberg mukaan lukien olivat sitä mieltä, että epätarkkuusyhtälöissä oli väistämättä kahden epätarkkuuden tulo. Kun toinen suure voidaan määrittää tarkasti, toisen suureen tarkkuus katoaa. (Kragh 2002)

Heisenberg selitti vuoden 1927 artikkelissaan epätarkkuusperiaatteen merkitystä siten, että klassisesta syyn ja seurauksen suhteesta on luovuttava, koska kvanttifysikaalista systeemiä ei voida määrittää täsmällisesti. Myös tulevaisuutta koskeva tieto on epätarkkaa. Heisenberg sanoi: *”Koska kaikki kokeet noudattavat kvanttimekaniikan lakeja ja näin ollen epätarkkuusperiaatetta, kausaalisuuden lakien virheellisyys on epäilyksettä itse kvanttimekaniikan seuraus. Emme voi tietää nykyisyyden kaikkia yksityiskohtia edes periaatteessa. Tästä syystä kaikki havaittu on valikoima mahdollisuuksien joukosta ja rajoitus sille, mitä tulevaisuudessa tapahtuu.”* (Kragh 2002, ks. myös Heisenberg 1965)

#### ♦ Komplementaarisuusperiaate

Vuoteen 1928 mennessä oli suoritettu useita valon hiukkas- ja aalto-ominaisuuksia verifioivia kokeita. Selittämättä oli kuitenkin vielä se, miksi valolla on näitä molempia ominaisuuksia. Bohr yritti vuonna 1928 vastata tähän kysymykseen komplementaarisuusperiaatteella: aalto- ja hiukkaskuvaus eivät ole ristiriitaisia keskenään, vaan toisiaan täydentäviä eli komplementaarisia. Molemmat aspektit

---

<sup>35</sup> Konjugoidut muuttujat ovat suurepareja, jotka liittyvät toisiinsa Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen avulla, ja joiden samanaikainen tarkka mittaaminen on mahdotonta. (Maalampi ja Perko 2002)



tarvitaan fysikaalisen ilmiön täydelliseen ymmärtämiseen mikrotasolla, mutta niitä ei voida koskaan havaita yhtäaikaisesti. (Mehra & Rechenberg 1982)

Epätarkkuusperiaate pohjautuu kvanttimekaniikkaan komplementaarisuuseriaatteen ollessa luonteeltaan filosofinen. Bohr esitti komplementaarisuuseriaatteen ajatuksia jo syksyllä vuonna 1927 korostaen, että kvanttimaailmaa ei voida havainnoida ilman, että havainnoitava järjestelmä häiriintyy. Hän pohti, miten systeemin tila voidaan määrittää ja miten siitä voidaan saada objektiivista tietoa, sillä komplementaarisuuseriaate näytti viittaavan havainnoijan ja havaitsijan välisen eron katoamiseen. Kaksi vuotta myöhemmin hän määritteli komplementaarisuuseriaatteen uutena kuvaustapana, jossa jokainen klassisten käsitteiden sovellus kieltää muiden klassisten käsitteiden samanaikaisen käytön, mikä on ilmiöiden kuvaamiseksi kuitenkin välttämätöntä. Vakioesimerkki komplementaarisuudesta on aalto-hiukkasdualismi. (Kragh 2002)

Komplementaarisuuden periaatteesta muodostui myöhemmin kvanttifysiikan kööpenhaminalaisen tulkinnan kulmakivi. Pauli jopa esitti, että kvanttimekaniikkaa alettaisiin kutsua komplementaarisuusteoriaksi suhteellisuusteoriaa mukaillen. Termin Kööpenhaminan tulkinta otti käyttöön Heisenberg vasta vuonna 1955. (Kragh 2002)

Monet 1930-luvun fyysikot omaksuivat Bohrin komplementaarisuuseriaatteen, mutta heitä kaikkia yhdistävänä tekijänä oli se, että he tunsivat Bohrin henkilökohtaisesti ja olivat vierailleet hänen tutkimuslaitoksessaan. Kööpenhaminan fyysikkojen piirin ulkopuolella komplementaarisuuseriaatella ei ollut juuri kannatusta. (Kragh 2002)

#### ♦ Kaksoisrakokoe

Kaksoisrakokokeessa valo tai hiukkassuihku ohjataan kulkemaan yhden tai kahden raon läpi. Kuljettuaan rakosysteemin läpi valo tai hiukkassuihku osuu rakosysteemin takana olevalle varjostimelle. Tarkastellaan ajatuskokeena tilanteita, joissa rakojen läpi etenee a) klassisia hiukkasia, b) klassisia aaltoja ja c) elektroneja. (ks. esimerkiksi Maalampi ja Perko 2002)

a) Klassisten hiukkasten jakauma  $P_{12}$  muodostuu rakojen 1 ja 2 jakaumien  $P_1$  ja  $P_2$  summasta:

$$P_{12} = P_1 + P_2 \quad (4.15)$$

b) Klassisten aaltojen, esimerkiksi valon, intensiteetti on verrannollinen amplitudin neliöön,  $I \sim A^2$ . Aaltojen kulkiessa molempien rakojen läpi muodostuu interferenssikuvio rakoista tulevien aaltojen summa-aaltona. Rakojen 1 ja 2 läpi tulevien aaltojen summa-aallon intensiteetti on

$$I_{12} \propto |A_1 e^{i\delta_1} + A_2 e^{i\delta_2}|^2 = (A_1 e^{i\delta_1} + A_2 e^{i\delta_2})(A_1 e^{-i\delta_1} + A_2 e^{-i\delta_2})$$

$$= A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 (e^{i(\delta_1 - \delta_2)} + e^{i(\delta_2 - \delta_1)})$$

eli

$$I_{12} \propto A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \delta, \quad (4.16)$$

missä  $\delta = \delta_2 - \delta_1$ . Ottamalla huomioon, että intensiteetti on verrannollinen amplitudin neliöön, saadaan lauseke muotoon

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (4.17)$$

Verrattaessa saatua tulosta klassisilla hiukkasilla saatuun tulokseen havaitaan, että siinä on lisänä interferenssitermi. Raoista 1 ja 2 tulevien aaltojen vaihe-erosta  $\delta$  riippuu se, tapahtuuko konstruktivinen eli vahvistava interferenssi vai destruktivinen eli heikentävä interferenssi. Interferenssimaksimi syntyy, kun aaltojen matkaerot ovat aallonpituuden monikertoja. (ks. esimerkiksi Maalampi & Perko 2002)

c) Elektroneilla saadaan sama tulos kuin klassisilla aalloilla. Kun toinen raoista peitetään, kuvio katoaa ja jakauma on samankaltainen kuin klassisilla hiukkasilla. Elektronin kulkiessa yhden raon läpi sen paikka tiedetään tarkasti. Epätarkkuusperiaateen mukaan liikemäärän epätarkkuus on tällöin suuri ja interferenssikuvio hajoaa. Kuviota ei muodostu tilanteissa, joissa elektronin kulku pystytään jäljittämään. (ks. esimerkiksi Maalampi & Perko 2002)

Paikan käsitteestä elektronin yhteydessä on luovuttava, koska elektroneja ”havaitaan” vain hetkellisinä ja paikallisina vuorovaikutustapahtumina varjostimella (ks. esimerkiksi Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994). Elektronit voidaankin ymmärtää elektronikentän kvanteiksi ja muut hiukkaslajit omien kenttensä kvanteiksi (ks. esimerkiksi Hobson 2003; Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994). Kvantit ilmenevät materian välisessä vuorovaikutuksessa, eikä niiden jatkuvasta olemassaolosta ole varmuutta. Kun näitä ”hiukkahavaintoja” on riittävästi, tulevat esille hiukkaslajin aalto-ominaisuudet. (ks. esimerkiksi Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994) Aaltoliikkeen käsite on kuitenkin hylättävä, koska kvanttifysiikassa kyseessä ei ole havaittava aaltoliike, vaan abstrakti todennäköisyysaalto eli aaltofunktio. Determinismistä on siten luovuttava ja otettava käyttöön todennäköisyyslaskinnat.

Vaikka kaksoisrakokoetta tarkastellaan tässä ajatuskokeena, kaikki edellä mainitut koejärjestelyt voidaan toteuttaa myös käytännössä ja tehdä samat havainnot sekä intensiteetiltään heikolla näkyvän aallonpituuden valolla että muilla säteily- ja hiukkaslajeilla. Lopputulos on kuitenkin aina sama: yksitellen varjostimelle saapuvat

kvanttioliot muodostavat vähitellen interferenssikuvion. Yksittäisen kvanttiolion osumakohtaa ei voida ennustaa, mutta jakauman todennäköisyys voidaan ennustaa rakojen geometriaan ja olioiden de Broglien aallonpituuteen perustuen (ks. esimerkiksi Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1994).

### **Kokeelliset havainnot**

#### ♦ Davissonin ja Germerin koe

Vuonna 1927 Davisson ja Germer tutkivat nikkelimetallin pintaa kohdistamalla siihen elektronisuihkun ja havainnoimalla eri kulmiin sironneiden elektronien lukumäärää. Tutkijat olettivat, että jopa kaikkein tasaisin pinta näyttäisi karhealta elektronien ”näkökulmasta” ja elektronisuihku siroaisi diffuusisti tasaisella intensiteettijakaumalla kulman  $\theta$  funktiona. Kokeen suorituksen aikana tapahtui vahinko: vakuunikammioon pääsi ilmaa ja metallipinta hapettui. Poistaakseen hapettuman tutkijat kuumensivat näytettä uunissa korkeassa lämpötilassa. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004)

Kun koe toistettiin, tulokset olivat erilaiset kuin aiemmin. Intensiteetissä esiintyi voimakas maksimi tietyissä kulmissa, ja sen paikka riippui kokeessa käytetystä kiihdytysjännitteestä. Davisson ja Germer tunsivat de Broglien hypoteesin ja huomasivat havaitulla olevan yhtenevyyttä röntgendiffraktion kanssa. Kuumennus oli synnyttänyt näytteeseen suuria yhtenäiskiteitä, joissa kidetasot olivat jatkuvia elektronisuihkun leveydellä. Tulos ei ollut sitä mitä he olivat etsineet, mutta he tunnistivat välittömästi, että elektronit olivat diffraktoituneet. He olivat verifioineet de Broglien hypoteesin. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004)

#### ♦ G. P. Thomsonin koe

Vuonna 1928 englantilainen G. P. Thomson<sup>36</sup> suoritti elektronidiffraktiokokeen käyttämällä ohutta metallifoliota kohtiona. Debye ja Scherrer olivat käyttäneet samanlaista tekniikkaa vuosia aiemmin röntgendiffraktioilmiön tutkimuksissaan. Interferenssikuvio muodostui intensiteettimaksimeista, jotka muodostivat renkaita tulevan säteen tulosuunnan ympärille. Thomsonin koetulokset vahvistivat de Broglien hypoteeseja. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004) Amerikkalainen Clinton Davisson ja G. P. Thomson saivat vuoden 1937 fysiikan Nobelin elektronin diffraktion kokeellisesta tutkimuksesta.

---

<sup>36</sup> G. P. Thomson oli J. J. Thomsonin poika. J. J. oli 31 vuotta aiemmin kokeellisesti verifioinut elektronin hiukkasluonteen.

#### 4.3.6 Schrödingerin aaltoyhtälö ja Bornin tulkinta

Erwin Schrödinger oli itävaltalaisen Zürichin yliopiston professori. Hän oli työskennellyt monilla fysiikan osa-alueilla, esimerkiksi yleisen suhteellisuusteorian, radioaktiivisuuden ja termodynamiikan parissa. Schrödinger tunsi Heisenbergin kvanttimekaniikan, mutta se oli hänen mielestään vaikea ja abstrakti, eikä kovin kiinnostava. Työskennellessään vuonna 1925 kaasuteorian parissa Schrödinger tutustui tuolloin suhteellisen tuntemattoman de Broglien työhön. Vuoden 1925 lopulla de Broglien aalto-hiukkasdualismi innosti Schrödingerin atomien aaltoteoriaan. Schrödinger johti vetyatomien aaltoyhtälön, jonka ratkaisuna hän arveli saavansa energian ominaisarvot eli spektrin. Relativistisen de Broglien teorian kanssa sopuoinnussa olevan yhtälön ratkaisu tuotti Sommerfeldin hienorakennekaavan, mutta se ei tuottanut oikeaa spektriä, joten Schrödinger päätyi julkaisemaan vain ei-relativistisen likiarvon ja siitä syntyvän Bohrin kaavan. Schrödinger julkaisi aaltomekaniikkaa koskevan työnsä *Kvantittuminen ominaisarvoprobleemana* neljässä osassa kesällä 1926 (Mehra & Rechenberg 1982). Hän uskoi selittäneensä aaltoteorialla Bohrin epäjatkuvat elektronien kvanttihypyt, joita hän piti kamalina. (Kragh 2002)

Schrödinger ymmärsi, että aaltofunktio ei voi olla reaalinen, niin kuin hän oli aiemmin ajatellut, vaan sen täytyy olla kompleksinen. Schrödingerin aaltomekaniikka perustui jo muilla teoreettisen fysiikan aloilla tunnettuihin matemaattisiin käsitteisiin ja operaatioihin, joita oli siten helpompi soveltaa käytännössä. Schrödingerin näkemys aaltofunktion luonteen ja merkityksen suhteen vaihteli. Alussa hän ajatteli hiukkasten koostuvan aalloista aaltopaketteina. Aaltomalli kohtasi kuitenkin ongelmia ja vuonna 1926 Schrödinger ehdotti, että elektroni ei olekaan lokaalinen hiukkanen, vaan se leviää avaruuteen. Tulon  $\Psi\Psi^*$  kautta saadaan eräänlainen sähköinen painofunktio, jolloin varaustiheys saa muodon  $e\Psi\Psi^*$ . (Kragh 2002)

##### ♦ Bornin tulkinta

Born esitti Schrödingerin yhtälölle todennäköisyystulkinnan, jonka mukaan aaltofunktion amplitudin neliöllä on fysikaalinen merkitys: aaltofunktion amplitudin neliö on verrannollinen hiukkasen todennäköisyyteen esiintyä tietyssä tilassa  $n$  hetkellä  $t$  (Born 1965).

$$P(t) \propto |\Psi(t)|^2, \quad (4.18)$$

Todennäköisyys sille, että kvanttihiukkanen on jossain tietyssä avaruuden osassa, saadaan ratkaisemalla integraali

$$P(\mathbf{r}, t) dV = \int \Psi^*(\mathbf{r}, t) \Psi(\mathbf{r}, t) dV \quad (4.19)$$

Oppikirjoissa Bornin tulkinta esitetään usein siten, että aaltofunktion amplitudin neliö on verrannollinen hiukkasen todennäköisyyteen  $P(\mathbf{r}, t)$  esiintyä pisteessä  $\mathbf{r}$  hetkellä  $t$  (ks. esimerkiksi Blatt 1992; Atkins 1994).

Pauli, Jordan ja Dirac kehittivät Bornin tulkintaa edelleen. Bornin tulkinta toi todennäköisyyden käsitteen mikrofysiikkaan, mikä merkitsi muutosta luonnonlaeissa. (Kragh 2002)

- ♦ Schrödingerin teorian vastaanotto

Kvanttiteoreetikot Göttingenissä ja Kööpenhaminassa olivat skeptisiä Schrödingerin aaltomekaniikkaa kohtaan ja katsoivat teorian olevan paluuta kehityksessä taaksepäin. Asenteita Schrödingerin teoriaa kohtaan kuvanee Heisenbergin toteamus Paulille: ”Schrödingerin aaltoteoria on inhottava”. Fyysikot kuitenkin ymmärsivät Schrödingerin luoman teorian vahvuuden ja kun matriisi- ja aaltomekaniikan samanarvoisuus osoitettiin, kvanttifysiikot alkoivat käyttää Schrödingerin laskennallisia menetelmiä tulkiten tuloksia Bohrin ja Heisenbergin sekä Bornin ajatusten mukaisesti. (Kragh 2002)

- ♦ Kvanttimekaaninen atomi

Elektronin tilaa kuvataan aaltofunktiolla  $\Psi(x, y, z, t)$ , joka sisältää kaiken mahdollisen tiedon elektronista. Kvanttimekaniikan matemaattinen teoria kuvaa, miten kvanttihiukkasen paikan, nopeuden, liikemäärän, energian ja pyörimismäärän keskimääräiset arvot voidaan määrittää aaltofunktion avulla. Aaltofunktio on matemaattinen funktio, jonka arvo vaihtelee tarkasteltavasta alueesta riippuen, se voi olla suuri, pieni tai nolla. Kvanttihiukkasen todennäköisyyden tarkasteltavassa tilavuudessa kertoo aaltofunktion neliön arvo eli todennäköisyystiheyden arvo. Jos todennäköisyystiheyden arvo on suuri tarkasteltavassa tilavuudessa, kvanttihiukkasen todennäköisyys olla kyseisessä alueessa on suuri. Jos taas todennäköisyystiheyden arvo on pieni, kvanttihiukkasen todennäköisyys olla ko. alueessa on pieni. Jos aaltofunktion neliön arvo on nolla tässä alueessa, kvanttihiukkasen todennäköisyys olla alueessa on nolla eli hiukkanen ei ole siellä. Mitä nopeammin aaltofunktio muuttuu kvanttihiukkasen paikan funktiona, sitä suurempi on hiukkasen kineettinen energia. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004)

Schrödingerin yhtälö voidaan ajatella seisovan aallon periaatteen yleiseksi esitysmuodoksi. Sen perusteella voidaan määrittää seisovien aaltofunktioiden muodot ja energiat, kun tunnetaan elektronin potentiaalienergia paikan funktiona. Schrödingerin teoriassa elektronilla ei ole kiertorataa, vaan puhutaan elektronin tilasta. (ks. esimerkiksi Young & Freedman 2004)

#### 4.3.7 Kurssin opetukselliset haasteet

Kvantti-ilmiöiden ja niiden ominaisuuksien käsittelyn kautta kurssin opetuksessa pyritään tukemaan oppijoiden fotonikäsitteen rekonstruktiota siten, että muodostuva käsitys noudattaa mahdollisimman hyvin tieteellistä käsitystä ja on myös myöhemmin ristiriidattomasti laajennettavissa (Koponen & Heikkinen 2005). Sekä fotonin että elektronin kvanttiolioisuutta korostetaan opetuksessa, pääpainon ollessa kuitenkin fotonin kvanttiolioisuuden tarkastelussa. Kvanttiolioisuuden omaksumiseksi oppijalta vaaditaan oman oppimisen ja tietämyksen pohdinnan eli metakognitiivisten taitojen lisäksi kurssi sisällön syvällistä analyysiä. Pintasuuntautuneelle, faktojen ulkoa oppimiseen keskittyvälle oppijalle fotonin ja elektronin kvanttiolioisuus ei ehkä avaudu, mutta syväsuuntautuneella, laajojen kokonaisuuksien hallintaan pyrkivällä oppijalla siihen on hyvät mahdollisuudet.

Kurssin opetuksen yleisenä tavoitteena on lisäksi, että oppijalle muodostuu kokonaiskuva kvanttifysiikan perusteista, jolloin lähtökohdat kvanttifysiikan opiskeluun jatkossa ovat hyvät.

## Luku V

### Tulokset ja tulkinta

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen tulokset ja niiden tulkinta. Aluksi tarkastellaan esitestin käsitteiden ja ilmiöiden tuloksia molempien opetusryhmien, opiskelijoiden ja opettajien osalta. Tämän jälkeen siirrytään tapaustutkimusoppijoiden oppimisprosessien kuvauksiin. Lopuksi tarkastellaan lopputestin tuloksia sekä opiskelijoiden ja opettajien suhtautumista kurssiin ja kurssilla käytettyihin opetusmenetelmiin.

#### 5.1 Esitestin tulokset

Esitestissä kartoitettiin kurssin keskeisten käsitteiden ja ilmiöiden hallintaa oppijoiden ennakkotiedon huomioimiseksi opetuksessa (ks. liite 1, s. 245 ja liite 2, s. 248). Keskeisiä käsitteitä ovat absorptio, emissio, sironta, kvantittuminen ja hiukkanen, ja keskeisiä ilmiöitä ovat mustan kappaleen säteily ja valosähköinen ilmiö.

Oppijoiden käsitykset absorptiosta, emissiosta ja sironnasta on luokiteltu sen mukaisesti, mitä fysikaalista mallia ne ilmentävät. Kvantittumisen ja hiukkasen käsitysten luokittelussa käsitykset on jaettu laadullisesti erilaisiin luokkiin. Seuraavaksi tarkastellaan oppijoiden käsityksiä mainituista käsitteistä ja ilmiöistä.

##### 5.1.1 Absorptio

Klassisen näkemyksen mukaan absorptio on prosessi, jossa sähkömagneettisen säteilyn energia muuntuu aineen tai kappaleen liikkeen vapausasteiden energiaksi. Atomisysteemiä tarkasteltaessa absorptio voidaan ymmärtää säteilykentän ja materian välisenä vuorovaikutustapahtumana, jossa fotonin energia virittää atomin elektronin korkeammalle energiatasolle.<sup>37</sup>

Absorption käsite näyttäytyi opiskelijoiden ja opettajien esitestin vastauksissa hyvin eri tavoin (taulukko 5.1, s. 92). Opiskelijoista kolme ja opettajista viisi määritteli absorption klassisen mallin avulla energian sitoutumiseksi aineeseen. Yksikään opiskelija tai opettaja ei kuitenkaan vastauksessaan esittänyt, *miten* energia sitoutuu

---

<sup>37</sup> Yleisesti kvanttifysiikassa absorptio on säteilykentän ja materian välinen vuorovaikutustapahtuma, jossa säteilykentän tila muuttuu kvantittuneesti.

aineeseen. Lisäksi yksi opiskelija ja viisi opettajaa käytti hieman epätasallisempää määritelmää, joka kuitenkin pohjautuu klassiselle absorptioon mallille.

**Taulukko 5.1.** Opiskelijoiden ja opettajien esitessissä ilmaisemien absorptioon käsitysten luokittelu.

VASTAUSKATEGORIA	Opiskelijat	Opettajat
<b>Klassinen malli:</b> aine vastaanottaa energiaa / energia sitoutuu aineeseen	3	5
<b>Vaatimaton klassinen malli:</b> aine vastaanottaa / imee säteilyä	1	5
<b>Kvanttimalli:</b> atomi vastaanottaa energiakvantin / fotonin energian	1	4
<b>Hybridimalli:</b> atomi vastaanottaa energiaa	-	2
<b>Vaatimaton tai epärelevantti vastaus</b> <sup>38</sup>	3	3
<b>Ei vastausta</b>	-	1
Yhteensä	8	20

Kuten taulukko 5.1 osoittaa, absorptioon kvanttimallia käytti vastauksessaan yksi opiskelija ja neljä opettajaa. Yksikään vastaus ei sisältänyt mainintaa siitä, mitä fotonin energialle tapahtuu tai mitä se saa aikaan. Lisäksi kaksi opettajaa ilmaisi esitessissä käsityksen, jonka mukaan atomi vastaanottaa energiaa. Tämä käsitys on luonteeltaan hybridimalli, eli siinä yhdistyvät klassisen (”energiaa”) ja kvanttimallin (”atomi vastaanottaa”) piirteet. Tiedollisesti vaatimattomia tai epärelevantteja vastauksia oli sekä opiskelijoiden että opettajien ryhmässä kolme. Yksi opettaja ei vastannut lainkaan tähän kysymykseen esitessissä.

Yleisellä tasolla vastauksia tarkasteltaessa voidaan todeta, ettei yksikään opiskelija selväsanaisesti maininnut absorptioon prosessiluonnetta tai kuvannut sitä aineen ja säteilyn välisenä vuorovaikutustapahtumana. Lisäksi noin puolet opiskelijoista (neljä opiskelijaa ja 11 opettajaa) kuvasi absorptiota säteilyn tai energian ”imeytymisenä” tai lausahduksella ”*aine imee säteilyä tai energiaa*”. Erityisesti imeä-verbin käyttö tarkoittaessa absorptiota ei ole suositeltavaa, koska se voi synnyttää mielikuvan energian aineellisuudesta. Lisäksi tämän kaltaisessa ilmaisussa aineelle annetaan aktiivinen rooli.

<sup>38</sup> Esimerkiksi (energian) imeytyminen/vastaanotto, säteilyn lähettäminen



### 5.1.2 Emissio

Klassisen mallin mukaan emissio on absorptiolle käänteinen prosessi, missä aineen tai kappaleen vapausasteiden energia muuntuu sähkömagneettisen säteilyn energiaksi. Atomisysteemiä tarkasteltaessa emissio voidaan ymmärtää säteilykentän ja materian välisenä tapahtumana, jossa korkeammassa energiatilassa ollut elektroni siirtyy alemmalle energiatilalle, jolloin energiatilojen välinen energiaero emittoituu atomista.<sup>39</sup>

Emission käsitykset olivat esitestin vastauksissa myös moninaisia (taulukko 5.2). Opiskelijoista kaksi ja opettajista kolme määritteli emissio klassisen mallin avulla. Kukaan opiskelijoista tai opettajista ei vastauksessaan kuitenkaan maininnut, mistä aineen energia on peräisin tai miten aine lähettää energiaa. Lisäksi kolme opettajaa ilmaisi vaatimattomamman klassisen mallin.

Kuten taulukosta 5.2 havaitaan, kvanttimallin ”atomi lähettää energiakvantin” ilmaisi yksi opiskelija ja neljä opettajaa. Yksikään vastaus ei sisältänyt mainintaa siitä, mitä atomissa ajatellaan tapahtuvan energiakvantin emittoituessa. Opettajista kolme esitti vastauksessaan hybridimallin, jossa kvanttimallin atomi lähettää säteilyä kuten klassinen värähtelijä säteilyn synnyn klassisessa mallissa. Vaatimattomia tai epärelevanttejä vastauksia oli opiskelijoiden ryhmässä kolme ja opettajien ryhmässä viisi kappaletta. Kaksi opiskelijaa ja yksi opettaja ei määrittelyt lainkaan emissio käsitettä esitestissä.

Yksikään opiskelija tai opettaja ei tuonut esille vastauksessaan emissio prosessiluonnetta tai määrittelyt emissiota aineen ja säteilyn välisenä vuorovaikutustapahtumana. Yleisimmin opiskelijat ja opettajat luonnehtivat emissiota ”lähettämiseksi”.

**Taulukko 5.2.** Opiskelijoiden ja opettajien esitestissä ilmaisemien emissio käsitusten luokittelu.

VASTAUSKATEGORIA	Opiskelijat	Opettajat
<b>Klassinen malli:</b> Aine lähettää energiaa	2	4
Vaatimaton klassinen malli: Aine lähettää säteilyä	-	3
<b>Kvanttimalli:</b> Atomi lähettää energiakvantin	1	4
<b>Hybridimalli:</b> Atomi lähettää säteilyä	-	3
<b>Vaatimaton tai epärelevantti vastaus</b> <sup>40</sup>	3	5
<b>Ei vastausta</b>	2	1
Yhteensä	8	20

<sup>39</sup> Yleisesti kvanttifysiikassa emissio on säteilykentän ja materian välinen vuorovaikutustapahtuma, jossa säteilykentän tila muuttuu kvantittuneesti.

<sup>40</sup> Esimerkiksi: (säteilyn) lähettäminen/luovuttaminen, (lähteen) säteily/säteilyn imeytyminen aineeseen

### 5.1.3 Sironta

Klassisen mallin mukaan sironta on prosessi, jossa sähkömagneettisen säteilyn tai hiukkassuihkun etenemissuunta muuttuu osuessaan kohteeseen. Hiukkasfysiikassa sironta on tapahtuma, jossa alkutilassa on kaksi hiukkasta, ja lopputilassa hiukkasia on kaksi tai useampia. Kvanttifysiikassa fotonin ja elektronin välinen sironta voidaan ymmärtää säteilykentän ja materian väliseksi vuorovaikutustapahtumaksi, jossa fotoni absorboituu ja välittömästi emittoituu. Hiukkasfysiikan kielellä fotonin ja elektronin sironta on siten tapahtuma, jonka alkutilassa on fotoni 1 ja elektroni, ja lopputilassa fotoni 2 ja elektroni. Tähän selitysmalliin viitataan tässä työssä sironnan kvanttimallilla.

Opiskelijoiden sironnan käsitysten luokittumista esittää taulukko 5.3. Opiskelijoista yksi ja opettajista neljä määritteli sironnan käsitettä sironnan klassisen mallin avulla fysikaalisesti hyväksyttävällä tavalla. Kolme opiskelijaa ja seitsemän opettajaa ilmaisivat vaatimattomaksi klassiseksi luokittuvan mallin vastauksissaan. Vaatimattomien klassisten mallien kategoria oli toinen vastausmäärältään suurimmista kategorioista. Näissä vastauksissa sironta määriteltiin hiukkasten tai säteilyn osumiseksi aineeseen tai hiukkasten irtoamiseksi aineesta. Vain yksi opettaja käytti vastauksessaan kvanttimallia ja yksi hybridimallia.

Toiseksi kahdesta suurimmasta vastauskategoriasta muodostui tiedollisesti vaatimattomien tai epärelevanttien vastausten kategoria, jossa sijaitsevat neljän opiskelijan ja kuuden opettajan vastaukset. Vain yksi opettaja ei määritellyt sironnan käsitettä esitestissä.

**Taulukko 5.3.** Opiskelijoiden ja opettajien esitestissä ilmaisemien sironnan käsitysten luokittelu.

VASTAUSKATEGORIA	Opiskelijat	Opettajat
<b>Klassinen malli:</b> hiukkasen/säteilyn/energian/fotonien suunta muuttuu	1	4
<b>Vaatimaton klassinen malli:</b> hiukkasten / säteilyn osuminen aineeseen, hiukkasten irtoaminen aineesta	3	7
<b>Kvanttimalli:</b> fotonin absorptio ja välitön emissio	-	1
<b>Hybridimalli:</b> säteilyn vuorovaikutus elektronin kanssa	-	1
Vaatimaton tai epärelevantti vastaus <sup>41</sup>	4	6
Ei vastausta	-	1
Yhteensä	8	20

<sup>41</sup> Esimerkiksi: hiukkassuihkusta karanneet hiukkaset, atomin viritystilän muutos, valon/säteilyn käyttäytyminen, heijastumisen kaltaista, fotonin ja elektronin törmäys

#### 5.1.4 Kvantittuminen

Klassisessa fysiikassa suureet saavat jatkuvasti kaikkia niille mahdollisia arvoja. Kvanttifysiikassa vain tietyt suureiden arvot (ominaisarvot) ovat mahdollisia. Arvot eivät voi muuttua mielivaltaisesti vaan muutos on mahdollinen vain tiettyjen arvojen välillä. Tällöin kyseessä on kvantittuminen. Tällä kurssilla kvantittuminen liittyy lähinnä säilyviin suureisiin energiaan, liikemäärään ja pyörimismäärään.

Yleisimmin opiskelijat ja opettajat liittivät kvantittumisen energian suureeseen. Energian, energiakvantit tai energiatilat tai -tasot mainitsi vastauksessaan relevantilla tavalla kuusi opiskelijaa ja 13 opettajaa (taulukko 5.4, s. 96).

Ymmärrettävästi kvantittumisen määritteli kaksi opettajaa, jotka esittivät vastauksessaan absorption ja emission kvanttimallit. Muissa vastauskategorioissa oppijat esittivät väittämiä ilman perusteluja, kuten kaksi opiskelijaa ja kolme opettajaa, jotka mainitsivat vastauksessaan atomin kvantittumisen ja energiatilat tai -tasot. Neljä opiskelijaa ja kahdeksan opettajaa jäi vastauksessaan vaatimattoman tiedon tasolle eli sijoittui kategoriaan *energian kvantittuminen*, jossa energian kvantittuminen oli vain todettu.

Yleisellä tasolla kvantittumista suureiden epäjatkuvuutena pyrki määrittelemään yksi opiskelija ja yksi opettaja, mutta vastaukset jäivät kaipaamaan tuekseen esimerkkejä. Vaatimattomien tai epärelevanttien kategoriaan luokittui vastauksensa perustella viisi opettajaa.

**Taulukko 5.4.** Opiskelijoiden käsitykset kvantittumisesta esitestissä.

VASTAUSKATEGORIA	Opiskelijat	Opettajat
<b>Absorption ja emission kvanttimallit:</b> Absorptio + emissio / virittyminen + viritystilan purkautuminen, energiakvantit	-	2
<b>Atomin kvantittuminen:</b> atomi / hiukkanen kvantittuu, energiatilat/-tasot, ei esimerkkejä	2	3
<b>Energian kvantittuminen:</b> energia esiintyy energiatiloina/-tasoina, energia on jakautunut eri suuruisiin osiin	4	7
<b>Suureiden epäjatkuvuus:</b> jatkuvan suureen muuttuminen tarkasteltavassa tapauksessa epäjatkuvaksi	1	1
Vaativaton tai epärelevantti vastaus <sup>42</sup>	-	6
Ei vastausta	1	2
Yhteensä	8	20

### 5.1.5 Hiukkanen

Hiukkanen on toinen klassisen fysiikan perusolioista ja laajasti käytetty käsite eri fysiikan osa-alueissa. Hiukkasen käsitettä käytetään myös arkikielessä tarkoittaessa esimerkiksi jotain havaittavissa olevaa, hyvin pientä oliota, kuten pölyhiukkasta. Hiukkanen voidaan myös ymmärtää malliksi, joka kuvaa oliota tai joko olion tai ilmiön käyttäytymistä.

Opiskelijoiden esitestin vastauksista puolet oli ns. mallivastauksia, jotka vaikuttivat opitun tiedon toistamiselta (liite 9, s. 257). Näissä vastauksissa opiskelijat eivät juurikaan kuvailleet hiukkasta ja sen ominaisuuksia, eivät maininneet lainkaan esimerkkejä tai eivät viitanneet hiukkasen malliluonteeseen. Loput vastauksista olivat epärelevantteja tai tiedollisesti vaatimattomia. Vastausten kategorisointia kuvaa taulukko 5.5 (s. 97). Vastausten perusteella vaikuttaa siltä, ettei kysymyksenasettelu ollut kovin onnistunut, koska saadut vastaukset eivät kohdistu hiukkasen ontologiaan.

<sup>42</sup>Esimerkiksi: ilmiö kvantittuu, virittyminen, hiukkasen latautuminen/varautuminen, hiukkasen muuttuminen säteilyenergiaksi, energia etenee säteilyssä kvantteina

**Taulukko 5.5.** Opiskelijoiden käsitykset hiukkasesta esitestissä.

VASTAUSKATEGORIA	Opiskelijat
Klassisessa fysiikassa kappaleiden paikka ja liikemäärä voidaan tietää tarkasti. Kvanttifysikaalisen hiukkasen paikka ja liikemäärä voidaan tietää vain tietyllä todennäköisyydellä	4
Epärelevantti tai vaatimaton vastaus <sup>43</sup>	4
Yhteensä	8

Toisen ryhmän testausta varten kysymyksenasettelua muutettiin siten, ettei siinä enää pyydetty vertailemaan klassista ja kvanttifysikaalista hiukkasesta, vaan keskityttiin ominaisuuksiin, joiden perusteella hiukkanen voidaan tunnistaa. Opettajien vastaukset olivatkin paljon moninaisempia (ks. liite 10, s. 258) ja kuvasivat paremmin vastaajan käsitystä hiukkasen ontologiasta. Kuten taulukko 5.6 osoittaa, hiukkasen määritteli malliksi viisi opettajaa ja mallien käyttämisen hiukkasen kuvailuun kaksi opettajaa. Aineen rakenneosaksi mallin ymmärsi neljä opettajaa. Näissä vastauksissa oli mainittu ainakin yksi ominaisuus, yleensä massa. Epärelevantteja tai tiedollisesti vaatimattomia vastauksia oli seitsemän. Kaksi opettajaa ei vastannut lainkaan hiukkasesta käsittelevään esitestin tehtävään.

**Taulukko 5.6.** Opettajien käsitykset hiukkasesta esitestissä.

VASTAUSKATEGORIA	Opettajat
<b>Dualismi:</b> Hiukkanen eli hiukkasmalli on toinen dualismin malleista	5
<b>Mallintava:</b> Hiukasta kuvataan malleilla	2
<b>Aineen rakenneosa</b> + ainakin yksi ominaisuus mainittu, yleensä massa	4
<b>Epärelevantti tai tiedollisesti vaatimaton vastaus</b> <sup>44</sup>	7
<b>Ei vastausta</b>	2
Yhteensä	20

<sup>43</sup> Esimerkiksi: hiukkasella on massa, hiukkasella ei ole massaa, suhteellisuusteoreettinen hiukkanen, jatkuva energiajakauma vs. energiatasot

<sup>44</sup> Kuten: protoni, elektroni ja neutroni, massallinen, massallinen tai massaton, energiapakkaus, johon vaikuttaa maan vetovoima

### 5.1.6 Mustan kappaleen säteily

Mustan kappaleen säteilyn vastaukset luokiteltiin kolmeen luokkaan: hyvät, tyydyttävät ja heikot vastaukset. Luokittelu on suhteellinen, ei absoluuttinen, sillä vastaukset olivat yleensä tiedollisesti vaatimattomia sisältäen osatouuksia, mutta eivät kokonaisvaltaista ymmärrystä tarkastellusta aiheesta. Tämän vuoksi kiitettävien vastausten luokkaa ei ole luokittelussa lainkaan. Heikoksi luokiteltu vastaus sisältää vähintään tietoa, tyydyttävä hieman enemmän tietoa ja hyvä eniten. Molempien opetusryhmien vastausten luokittelu on tehty samoja kriteerejä käyttäen, joten tulosten vertaaminen toisiinsa olisi mahdollista.

#### A. Opiskelijat

Opiskelijoiden esitessään mustan kappaleen säteilyn ymmärtämistä tutkittiin mustan kappaleen säteilylakeja esittävän kuvion avulla. Kuviossa verrattiin Planckin, Wienin sekä Rayleighin ja Jeansin säteilylakien antamia ennusteita mustan kappaleen säteilyn kokeellisiin tuloksiin. Säteilylait oli nimetty kuvioon, mutta y-askelin suuretta oli merkitty funktiolla  $f(\lambda, T)$ . Tehtävän yhteydessä ei kerrottu, että se liittyy mustan kappaleen säteilyyn.

#### **Ilmiön tunnistaminen**

Mustan kappaleen säteilyn ilmiön tunnistaminen säteilykuvaajien perusteella ei ollut opiskelijoille kovin helppoa; vain kolme opiskelijaa tunnisti ilmiön mustan kappaleen säteilyksi. Puolet opiskelijoista hallitsi säteilykuvaajiin liittyvät havainnot tyydyttävästi ja puolet jätti kysymyksen vastaamatta (taulukko 5.7, s. 99). Esimerkiksi Erkin vastaus luokitui tyydyttäväksi:

**Erkki:** ”Kuvaajat liittyvät infrapunakatastrofiin eli klassisen fysiikan lakien avulla selitettynä (R-J-laki) aallonpituuden ja lämpötilan välinen yhteys oli mahdoton. Planckin laki selitti tilanteen paremmin ja todennäköisemmin.”

Erkin vastaus on tyydyttävää tasoa, koska hän ei mainitse mustan kappaleen ilmiötä ja nimeää ultraviolettikatastrofin virheellisesti infrapunakatastrofiksi. Erkki tiesi, että Rayleighin ja Jeansin laki on klassinen laki, mutta ilmeisesti kuviossa esitetty y-akselin funktio sai Erkin päättelämään, että kyseessä on aallonpituuden ja taajuuden välinen riippuvuus, vaikka itse asiassa kyseessä on aallonpituuden ja säteilyn energiatiheyden välinen suhde.

**Taulukko 5.7.** Opiskelijoiden ( $n = 8$ ) esitestin tulokset mustan kappaleen (MK) säteilyn tehtävässä.

TEHTÄVÄN OSIO	Vastauksen taso			
	Hyvä	Tyydyttävä	Heikko	Ei vastausta
a. Ilmiön tunnistaminen	-	4	-	4
b. Säteilyspektrin y-akselin suure ja yksikkö	-	-	4	4
c. Säteilylakien vertaaminen	-	3	1	4
d. Planckin lain tulkinta	-	1	-	7
Yhteensä	0	8	5	19

### Säteilykuvaajan y-akselin suure ja yksikkö

Opiskelijat eivät kyenneet päättämään säteilykuvaajan y-akselilla olevaa suuretta, joka oli merkitty kuvioon funktiona  $f(\lambda, T)$  (taulukko 5.7). Puolet opiskelijoiden vastauksista oli heikkoja, ja puolet opiskelijoista jätti kysymyksen vaille vastausta. Esimerkiksi Aapon vastaus ”kuvannee jollain tavalla lämpötilan ja aallonpituuden välistä yhteyttä” luokitui heikkojen vastausten kategoriaan.

### Säteilylakien vertaaminen ja Planckin lain tulkinta

Säteilylakien vertaaminen toisiinsa sujui tyydyttävästi kolmelta opiskelijalta ja heikosti yhdeltä (taulukko 5.7). Puolet opiskelijoista ei vastannut kysymykseen. Aapo vastasi kysymykseen seuraavasti:

**Aapo:** ”R-J pätee myös korkeilla lämpötiloilla, Wienin ja Planckin laki kaikilla aallonpituuksilla. Pallukat ovat varmaankin alkuaineiden ominaissäteilyn arvoja. R-J teoreettinen.”

Aapon vastaus luokituu heikoksi, koska hän ilmeisesti tulkitsi y-akselin kuvaavan jollain tapaa lämpötilaa, vaikka säteilykuvaajat esittävät kaikki samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen teoreettisia ennusteita ja kokeellisia tuloksia. Lisäksi Aapo esitti kokeellisten tulosten olevan alkuaineiden ominaissäteilyn arvoja, vaikka kyseessä on mustan kappaleen säteily.

Planckin lakia tulkitsi yksi opiskelija tyydyttävästi, kun seitsemän jätti tämän kysymyksen vastaamatta.

## B. Opettajat

Opettajien esitessissä tutkittiin mustan kappaleen ja sen säteilyspektrin sekä ultraviolettikatastrofin ja mustan kappaleen säteilyn merkityksen ymmärtämistä. Tehtävän yhteydessä esitettiin sama kuvio kuin opiskelijoiden esitessissä.

### **Musta kappale**

Mustan kappaleen käsitteen ymmärtäminen oli enimmäkseen tyydyttävää ja heikkoa, kuten taulukosta 5.8 (s. 101) käy ilmi. Kaksi opettajaa ei vastannut tähän kysymykseen lainkaan. Esimerkiksi Uskon vastaus luokituu heikkojen vastausten kategoriaan:

**Usko:** ”Esim. aurinko on musta kappale. Sen ulkokuori vastaanottaa sisäosista vapautuvan energian ja emittoi tämän säteilynä ulospäin. Vaikea asia.”

### **Mustan kappaleen säteilyspektri**

Kuten taulukosta 5.8 (s. 101) nähdään, mustan kappaleen säteilyspektrin selitti tyydyttävästi yksi opettaja ja heikosti kuusi opettajaa. Vastaamatta jättäneiden lukumäärän oli huomattava eli 13. Oton vastaus oli heikkoa tasoa:

**Otto:** ”Kappaleen spektrissä on tietyllä aallonpituudella maksimi. Kuvanee kpl:een ”taipumusta” ottaa vastaan ja luovuttaa energiaa kpl:elle tyypillisinä annoksina kvantteina.

### **Ultraviolettikatastrofi**

Ultraviolettikatastrofin hallitsi tyydyttävästi kaksi opettajaa ja heikosti kolme opettajaa. Vastaamatta tämän kysymyksen jätti 15 opettajaa. Eeron vastaus luokitui tyydyttäväksi, koska hänellä oli jonkinlainen mielikuva asiasta: ”Ilmiössä tapahtui tietyillä aallonpituuksilla jotain sellaista mitä ei olisi pitänyt ts. ilmiö käyttäytyi erilailla kuin sitä selittävä laki oli ennustanut”.

### **Mustan kappaleen säteilyn merkitys**

Mustan kappaleen merkityksen hallitsi hyvin yksi opettaja ja heikosti viisi opettajaa. Tämän kysymyksen jätti väliin 14 opettajaa. Tuomas vastasi kysymykseen seuraavasti:

**Tuomas:** ”Ensimmäinen ilmiö, jonka selittämisessä jouduttiin käyttämään kvanttifysiikkaa ja otettiin käyttöön Planckin vakio  $h$ .”

Tuomaan vastauksesta käy ilmi hänen tieteellisen näkemyksen kanssa koherentti näkemyksensä mustan kappaleen säteilyn merkityksestä ja hänen vastauksensa luokitui hyväksi.



**Taulukko 5.8.** Opettajien (n = 20) esitestin tulokset mustan kappaleen säteilyn tehtävässä.

TEHTÄVÄN OSIO	Vastauksen taso			
	Hyvä	Tyydyttävä	Heikko	Ei vastausta
a. Musta kappale	3	8	7	2
b. Säteilyspektri	-	1	6	13
c. Ultraviolettikatastrofi	-	2	3	15
d. Ilmiön merkitys	1	-	5	14
Yhteensä	4	11	21	44

### 5.1.7 Valosähköinen ilmiö

Valosähköisen ilmiön vastaukset luokiteltiin samalla periaatteella kuin mustan kappaleen säteilyn vastaukset hyviin, tyydyttäviin ja heikkoihin vastauksiin. Luokittelu on suhteellinen, ei absoluuttinen, sillä vastaukset olivat yleensä tiedollisesti vaatimattomia ja sisälsivät osatouuksia, mutta eivät kokonaisvaltaista ymmärrystä tarkastellusta aiheesta. Tämän vuoksi kiitettävien vastausten luokkaa ei ole luokittelussa lainkaan. Heikoksi luokiteltu vastaus sisältää vähintään tietoa, tyydyttävä hieman enemmän tietoa ja hyvä eniten. Molempien opetusryhmien vastausten luokittelu on tehty samoja kriteerejä käyttäen, joten tulosten vertaaminen toisiinsa on mahdollista.

#### A. Opiskelijat

Opiskelijoiden esitestissä pyydettiin selittämään valosähköinen ilmiö ja tehtävässä esitetyn ilmiön tutkimiseen käytettävän koelaitteiston toimintaperiaate. Esitestissä ei nimetty valosähköistä ilmiötä, koska haluttiin selvittää, tunnistavatko opiskelijat tämän cum laude -laboratoriotöistäkin tutun ilmiön koelaitteiston perusteella. Opiskelijoista kuusi osasi kuvailla ilmiön ja heistä kaksi nimesi sen. Lisäksi yksi opiskelijoista oli liittännyt koelaitteiston säteilyn absorptioon ja emissioon, mutta hänen vastauksensa sisälsi myös valosähköiseen ilmiöön tai sen koelaitteistoon liittyvää fysikaalisesti oikeaa tietoa.

#### **Ilmiön hallinta**

Valosähköisen ilmiön hallitsi tyydyttävästi kaksi ja heikosti viisi opiskelijaa, kuten taulukosta 5.9 (s. 102) havaitaan. Esimerkiksi Laurin vastaus oli tasoltaan tyydyttävä ja Eskon heikko.

**Lauri:** ”Valosähköilmiöön. Sähkömagneettisen säteilyn osuessa aineeseen siitä voi irrota elektroneja. Mikäli fotonit luovuttaa tarpeeksi energiaa elektronille se voi irrota ytimen vetovoimasta.

**Esko:** ”Fotonin aiheuttamaan virtaan.”

Molemmat vastaukset ovat tiedollisesti vaatimattomia, mutta eivät fyysikaalisen tiedon kanssa ristiriitaisia. Yksi opiskelija ei vastannut lainkaan ilmiötä tarkastelemaan kysymykseen.

### Laitteiston toimintaperiaate

Kuten taulukko 5.9 osoittaa, laitteiston toimintaperiaatteen hallinta oli melko samaa tasoa kuin ilmiön hallinta. Tyydyttävästi toiminnan selitti neljä opiskelijaa, heikosti yksi ja vastaamatta jätti kolme opiskelijaa. Aapon vastaus oli tyydyttävää tasoa:

**Aapo:** ”Tietyn taajuisella valolla ”pommitetaan” kohtiota, jonka jarrutusjännitettä voidaan säätää. Kohtiosta siroaa elektroneja tietyllä nopeudella jolloin piirissä kulkee virtaa.”

Aapon vastauksesta käy ilmi, että hän tiesi ilmiön tapahtuvan vain tietyn taajuisella säteilyllä. Kyseessä ei kuitenkaan ole elektronien sironta, vaan irtoaminen metallipinnasta. Aapon viittaus elektronien nopeuksiin on monimerkityksinen ja sitä on tarkemmin analysoitu luvussa 5.3.

**Taulukko 5.9.** Opiskelijoiden (n = 8) esitestin tulokset valosähköisen ilmiön tehtävässä.

TEHTÄVÄN OSIO	Vastauksen taso			
	Hyvä	Tyydyttävä	Heikko	Ei vastausta
a. Ilmiö	-	2	5	1
b. Laitteiston toimintaperiaate	-	4	1	3
Yhteensä	0	6	6	4

## B. Opettajat

Opettajien esitessään valosähköinen ilmiö oli nimetty tehtävän asettelussa ja laitteiston toimintaperiaatteen sijaan kysyttiin valosähköisen ilmiön merkitystä kvanttifysiikassa.

### **Ilmiö**

Ilmiön hallinta jakautui melko tasaisesti kaikkiin vastausluokkiin ei vastausta -luokan ollessa kuitenkin suurin (taulukko 5.10, s. 104). Esimerkiksi Askon vastaus luokitettiin heikoksi ja Oton tyydyttäväksi:

**Asko:** ”Fotonin osuessa väliaineen elektroniin muodostuu uusi foton ja säteilyä.”

**Otto:** ”Valosähköisessä ilmiössä foton törmää atomiin ja luovuttaa kaiken energiansa atomin elektronille. Foton häviää.”

Vastauksensa perusteella Asko sekoitti toisiinsa valosähköisen ilmiön Comptonin ilmiöön, mutta sanontatapa ”muodostuu uusi foton ja säteilyä” on siitä huolimatta kovin erikoinen, eikä tieteellisen käsityksen mukainen. Oton vastaus keskittyi fotonin ja elektronin tai atomin välisen vuorovaikutuksen kuvaamiseen ja on fysikaalisesti ajatellen oikean suuntainen mutta ei riittävä ilmiön kokonaisvaltaiseksi ymmärtämiseksi.

### **Merkitys**

Valosähköisen ilmiön merkitys oli melko heikosti tiedetty: Yksi opettaja hallitsi sen hyvin, viisi tyydyttävästi ja kaksi heikosti (taulukko 5.10, s. 104). Huomattavan suuri osa opettajista, 12, ei vastannut lainkaan tähän kysymykseen. Tuomas esitti valosähköisen ilmiön merkitykseksi seuraavaa:

**Tuomas:** ”Todistaa, että valo absorboituu kvantteina, fotoneina, tietyn suuruisina energia-annoksina. Fotonin energia riippuu sen taajuudesta  $E = hf$ .”

Tuomaan vastaus luokitettiin tasoltaan tyydyttäväksi. Tieteellisen tulkinnan mukaan valosähköinen ilmiö vahvistaa mustan kappaleen säteilyn yhteydessä tehtyä oletusta aineen ja säteilyn välisen energianvaihdon kvantittuneisuudesta. Valosähköisen ilmiön avulla pystyttiin myös määrittämään Planckin vakion arvo, jonka suuruutta ei tätä ennen tiedetty.

**Taulukko 5.10.** Opettajien (n = 20) esitestin tulokset valosähköisen ilmiön tehtävässä.

AIHEEN OSA-ALUE	Vastauksen taso			
	Hyvä	Tyydyttävä	Heikko	Ei vastausta
a. Ilmiö	4	5	5	6
b. Merkitys	1	5	2	12
Yhteensä	5	10	7	18

### 5.1.8 Keskeisten tulosten koonti ja merkitys

Esitestin tulosten perusteella opiskelijoiden ja opettajien kvantti-ilmiöiden ja käsitteiden hallinta oli yleisesti vaatimatonta tasoa kurssin alussa. Fysiikan opettajaopiskelijoiden olisi toivonut menestyvän esitestissä paremmin, koska heistä enemmistö oli suorittanut pakollisen cum laude -tasoisien kvantti- ja atomifysiikan ja yksi lisäksi laudatur-tasoisien kvanttifysiikan kurssin. Voidaankin todeta, etteivät perinteiset kvanttifysiikan kurssit johda tarkoituksenmukaiseen kvantti-ilmiöiden ja käsitteiden hallintaan.

Myös opettajien esitestin tulos on melko heikko ottaen huomioon, että kolme opettajaa oli opettanut esitestin aiheita käsittelevää lukiokurssia useita kertoja ja neljä opettajaa yhdestä kahteen kertaa. Muissa oppilaitoksissa työskentelevien opettajien ja yläkoulun opettajien osalta tulokset ovat sikäli ymmärrettävät, että he eivät käsittele työssään välttämättä testissä esiintyneitä aiheita peruskäsitteitä lukuun ottamatta, joiden hallinnan on perusteltua ajatella kuuluvan kuitenkin jokaisen fysiikkaa opettavan yleissivistykseen.

Sähkömagneettisen säteilyn ja materian välisten perusvuorovaikutusten, absorption, emission ja sironnan, täsmällinen määrittely osoittautui odotettua vaikeammaksi tehtäväksi sekä opiskelijoille että opettajille. Huomattavan suuri osa heistä ilmaisi esitestin vastauksessaan tieteellisen käsityksen vastaisen tai tiedollisesti vaatimattoman käsityksen absorptiosta, emissiosta tai sironnasta. Yksikään klassista määritelmää käyttänyt opiskelija tai opettaja ei korostanut käsitteiden prosessiluonnetta, eivätkä kvanttimääritelmiä käyttäneet opiskelijat tai opettajat kuvanneet niitä tapahtumiksi. Vain puolet oppijoista pystyi määrittelemään absorption ja emission käsitteet hyväksyttävästi joko klassisen tai kvanttimallin avulla. Opiskelijoilla absorption ja emission klassiset mallit olivat kvanttimalleja yleisimpiä, mutta opettajien ryhmässä esiintymisen välillä ei ollut juurikaan eroa. Vain murto-osa opiskelijoista ja opettajista määritteli sironnan käsitteen hyväksyttävästi klassisella mallilla. Tämä huolestuttava tulos muistuttaa siitä, miten tärkeää oppijoiden ennakkotiedon kartoittaminen ennen opetusta on. Vaikka kyse olisi peruskäsitteiden hallinnasta, voivat oppijoiden ennakkotiedot osoittautua puutteellisiksi.

Tulosten mukaan hiukkasen käsite voi tuoda oppijan mieleen ulkoa opitun määritelmän, mallintavan käsityksen tai liittyä oppijan mielestä aineen rakenneosiin. Noin puolet tutkimukseen osallistuneista oppijoista ei pystynyt vastauksessaan tuomaan esille jäsentynyttä mallia tai määritelmää hiukkaselle. Hiukkasen käsitteen ymmärtämistä kartoittavan tehtävän tulokset osoittavan hiukkasen käsitteen käytön yleiskäsitteenä kvanttifysiikan opetuksessa olevan ongelmallista, koska opiskelijoiden käsitykset siitä ovat hyvin moninaisia.

Hiukkasen käsitteen käyttöön kvanttifysiikan opetuksessa tuleekin kiinnittää riittävästi huomiota. Mikäli halutaan varmistaa että oppijat ja opettaja puhuvat samaa kieltä, ja erottaa klassiset hiukkaset kvanttifysiikan hiukkasista, voidaan hiukkasen käsite esimerkiksi korvata kvanttihiukkasen tai kvanttiolion käsitteellä kuten tähän tutkimukseen kuuluvilla kursseilla on tehty Bungen (2003) sekä Levý-Leblondin ja Balibarin (1990) suositusten mukaisesti.

Mustan kappaleen säteilyn ja valosähköisen ilmiön aiheet sekä opiskelijat että opettajat hallitsivat esitestin perusteella heikosti kurssin alussa. Tilanne on hieman huolestuttava, sillä molemmat ilmiöt kuuluvat modernin fysiikan lukiokurssin opetussuunnitelmaan (Opetushallitus 2003).

#### 5.1.9 Tapausopiskelijoiden ja –opettajien valinta

Raportoitaviksi tapausopiskelijoiksi valittiin taustatietojen ja esitestin perusteella Aapo ja Lauri. Aapo oli kurssin alkaessa jo suorittanut opettajan pedagogiset opinnot ja noin 50 opintoviikkoa fysiikan kursseja, mukaan lukien kvantti- ja atomifysiikan cum laude -kurssin. Lauri sen sijaan ei ollut vielä aloittanut pedagogisia opintoja ja oli opiskellut fysiikan kursseja 35 opintoviikon edestä. Hän ei ollut suorittanut kvanttifysiikkaan liittyviä kursseja.

Raportoitaviksi tapausopettajiksi valittiin matematiikkaa pääaineenaan opiskelleet Tuomas ja Timo. Tuomaalla oli pitkä opetuskokemus lukiotasolta ja myös Timo oli työskennellyt muutaman vuoden lukion opetustehtävissä. Molemmat olivat opiskelleet kvanttifysiikkaa osana omia opintojaan. Tuomas ja Aapo edustavat esitestissä ryhmiensä parhaimmistoa Laurin ja Timon ollessa tulokseltaan ryhmiensä keskitasoa.

Seuraavaksi siirrytään tarkastelemaan tapausoppiloiden esi- ja lopputestien sekä haastattelujen vastauksista muodostettuja oppimisprosessikuvauksia. Ensimmäisenä esitetään tapausopettaja Tuomaan oppimisprosessin kuvaus, minkä jälkeen tarkastellaan tapausopiskelija Aapon oppimisprosessikuvausta. Tuomaan ja Aapon yksityiskohtaisten kuvausten jälkeen tuodaan esille tapausopettaja Timon ja tapausopiskelija Laurin oppimisprosessien tiivistetyimmät kuvaukset.

## 5.2 Tapausopettaja Tuomas

Tuomas oli työskennellyt useiden vuosien ajan lukion opettajana, joten häntä voidaan pitää fysiikan opettajaeksperttinä. Tuomaan menestyminen esitestissä oli opettajien parhaimmista.

### 5.2.1 Esitesti ja ensimmäinen haastattelu

Esitestissä ja ensimmäisessä haastattelussa tarkastellut aiheet on esitetty taulukossa 5.11. Samoja aiheita tarkasteltiin sekä esitestissä että haastattelussa haastateltavan esitestissä esille tuoman tiedon syventämiseksi ja epäselvien vastausten varmistamiseksi tai selventämiseksi. Lisäksi haastattelussa käsiteltiin myös sellaisia aiheita, joita esitestissä ei ollut lainkaan.

**Taulukko 5.11.** Aiheiden esiintyminen esitestissä ja ensimmäisessä haastattelussa.  
x = aihe esiintyi testissä tai haastattelussa.

AIHE	Esitesti	Haastattelu 1
Absorptio	x	x
Emissio	x	x
Sironta	x	x
Sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismi		x
Kvantittuminen		x
Hiukkanen	x	
Fotoni		x
Elektroni		x
Comptonin ilmiö		x
Valosähköinen ilmiö	x	x
Mustan kappaleen säteily	x	x

#### A. Absorptio ja emissio

Absorptio. ”Fotoni menettää kaiken energiansa ja lakkaa olemasta. Muu hiukkanen menettää liike-energiansa ja pysähtyy esim. väliaineeseen.”

Emissio. ”Fotonin lähteminen atomin elektroniverhosta tai muun hiukkasen irtoaminen tietyllä nopeudella esim. atomiytimestä.”

Haastattelussa Tuomas kertoi, että sähkömagneettisen säteilyn absorptiossa säteily imeytyy aineeseen eli fotonin menettää kaiken energiansa. Emissio puolestaan on absorptiolle vastakkainen eli se tarkoittaa säteilyn irtoamista aineesta. Tuomas selittää, mitä emissiossa tapahtuu:

- Tällöinen fotonin (...) jos se emittoituu atomista, niin silloin atomi on ollut, esimerkiksi elektroni on ollut viritystilassaan, ja kun se viritystila (-) se siirtyy tai elektroni siirtyy alemmalle viritystilalle, niin se energiatason välinen ero (...) emittoituu fotonina kun energia on sopiva.

Tulkinta. Tuomas selitti absorptioita ja emissioita hyväksyttävästi sekä klassisen että kvanttimallin avulla. Ilmeisesti hän ajatteli fotonin absorptiossa syntyvän ja emissiossa kuolevan. Säteilyn imeytyminen ja irtoaminen olivat Tuomaan synonyymejä absorptiolle ja emissiolle.

## B. Sironna ja Comptonin ilmiö

Sironna. ”Fotonien tai muiden hiukkasten etenemissuunnan muutos esim. törmäyksessä esteeseen.”

Tuomaan mukaan valon tai fotonien sironna on etenemissuunnan muuttumista. Esimerkiksi Comptonin sironnassa fotonin törmäys johonkin hiukkaseen, menettää osan energiastaan ja muuttaa etenemissuuntaansa. Kysyttäessä, mitä fotonin menettämälle energialle tapahtuu, Tuomas kertoi seuraavaa:

- Compton sironna on () kun tavallaan fotonin, tai valon hiukkasmallin avulla selitettävän (...) törmäyksessä säilyy liikemäärä ja (-) energia (...) jos se myös törmäys paikallaan olevaan elektroniin se menettää osan energiastaan sille elektronille.

Lisäksi Tuomas arveli, että Comptonin ilmiö tapahtuu suurienergisellä säteilyllä, esimerkiksi röntgensäteilyllä.

Tulkinta. Tuomas ymmärsi sironnan hiukkasten tai fotonien etenemissuunnan muuttumiseksi eli sovelsi sironnan klassista mallia. Klassiseksi tätä mallia kutsutaan siksi, että siinä fotonin käyttäytyminen kuten klassinen kappalemäinen olio törmätessään esteeseen.

Comptonin ilmiötä Tuomas piti fotonin ja elektronin kimmoisana törmäyksenä, jossa energia ja liikemäärä säilyvät, ja jonka seurauksena niiden etenemissuunta muuttuu. Hän ymmärsi fotonin valon hiukkasmalliksi. Comptonin sironnassa Tuomas ajatteli törmäyvän ja sironneen fotonin olevan sama. Hän ei vaikuttanut tässä yhteydessä ymmärtävän, että fotonin vastaanottaa ja luovuttaa kaiken energiansa vuorovaikutustapahtumassa elektronin kanssa eli sironnassa tapahtuu absorptio ja

välitön emissio. Ilmeisesti kyse oli Comptonin ilmiön matemaattisessa tarkastelussa käytettävän kimmoisan törmäyksen mallin ominaisuuksien liittämistä fotonin ominaisuuksiksi.

### C. Sähkömagneettisen säteilyn synty

Tuomaan mukaan sähkömagneettista säteilyä voidaan pitää myös aaltolina, jotka kuljettavat energiaa. Hän kertoi, että radioaaltoista säteilyä syntyy värähtelypiireissä ja lämpösäteilyä molekyylien värähdysliikkeessä. Näkyvän valon syntymisen Tuomas selitti elektroniverhon atomin siirtymisenä korkeammalta energiatasolta alemmalle. Lisäksi hän kertoi röntgen- ja gammasäteilyn syntyvän atomiytimissä.

Kysyttäessä yhteistä mekanismia sähkömagneettisen säteilyn eri lajien synnylle Tuomas esitti sähkömagneettisen säteilyn synnylle kaksi erilaista mallia.

- Kyllähän siinä tavallaan on kaksi (-) eri mallia millä selitetään (...) kun varattu hiukkanen on kiihtyvässä liikkeessä, niin silloin (...) voi syntyä sähkömagneettista säteilyä. Taikka (...) voi sitten atomeissa tai muissa, et jos (...) elektroni siirtyy energiatasolta alemmalle, niin silloin syntyy (...) säteilykvantti. Et siihen on tavallaan kaksi erilaista teoriaa, joita (...) käytetään. Molemmat selittää ihan hyvin eri ilmiöitä.

- *Mikä se säteilykvantti on?*

- Sähkömagneettinen säteily voi (-) syntyä (...) kvantteina taikka absorboitua kvantteina ja (...) tietyt kokeelliset ilmiöt, kuten valosähköinen ilmiö (...) osoittaa sen.

Tulkinta. Tuomaan ymmärrys sähkömagneettisesta säteilystä ja sen lajeista oli kokonaisuutena hyvä. Hän hallitsi sähkömagneettisen säteilyn eri lajien, kuten radiosäteilyn, näkyvän valon ja röntgen- ja gammasäteilyn syntymekanismit. Hän ymmärsi klassisen säteilyn synnyn värähtelijämallin ja atomin viritystilojen muuttumiseen liittyvän kvanttimallin selkeästi erillisiksi, yleisiksi malleiksi.

### D. Valosähköinen ilmiö

Esitestissä valosähköiseen ilmiöön liittyi tehtävä, jossa pyydettiin selittämään valosähköinen ilmiö ja pohtimaan sen merkitystä.

”Fotoni törmää metallin pintaan ja absorboituu siihen. Fotonin energia (jos se on riittävän suuri) kuluu elektronin irrotustyöhön ja elektronin liike-energiaksi.”

”[Valosähköinen ilmiö] todistaa, että valo absorboituu kvantteina, fotoneina, tietyn suuruusina energia-annoksina. Fotonin energia riippuu sen taajuudesta  $E = hf$ .”



Haastattelussa Tuomas esitti, että valosähköisessä ilmiössä sähkömagneettinen säteily irrottaa metallin pinnasta elektroneja. Hän lisäsi, että esimerkiksi ultraviolettisäteily saa aikaan elektronien irtoamisen sinkin pinnasta, mutta säteilyn aallonpituuden tulee olla riittävän lyhyt elektronien irrottamiseksi tietyistä metallista. Tuomas perusteli säteilyn aallonpituuden vaikutusta ilmiön tapahtumiseen Einsteinin selityksellä:

- Tähän se on se Einsteinin selitys sille valosähköiselle ilmiölle, että (-) valo absorboituu fotoneina ja yhden fotonin energia on se Planckin vakio kertaa taajuus (...) sen fotonin energia pitää olla vähintään elektronin irrotustyön suuruinen, et se elektroni voi irrota.

Tulkinta. Tuomas hallitsi hyvin valosähköisen ilmiön ymmärtäen ilmiön taajuusriippuvuuden ja mainiten irrotustyön käsitteen. Esitettiin vastauksesta kävi ilmi, että hän ymmärtää käsitteet kvantti, fotoni ja energia-annos synonyymeiksi.

#### E. Mustan kappaleen säteily

Esitettiin tehtävässä pyydettiin kertomaan, mitä mustalla kappaleella tarkoitetaan.

”Musta kappale ei heijasta muualta tullutta valoa vaan mustan kappaleen säteily on lähtöisin mustan kappaleen aineesta itsestään.”

Haastattelussa Tuomas kuvasi mustaa kappaletta ja sen säteilyä samalla tavalla kuin esitettiin kuitenkin täsmentäen, että mustan kappaleen säteily on peräisin mustan kappaleen omista atomeista. Säteilyspektrin käyttäytymistä lyhyillä aallonpituuksilla Tuomas selitti Planckin kvanttihypoteesin avulla:

- Planck on joutunut tekemään (...) kvanttihypoteesin, eli ottamaan (...) Planckin vakion käyttöön, että mustan kappaleen säteily pitää syntyä (...) energia-annoksina, että on pystynyt tuon jakauman selittämään.

Tulkinta. Mustan kappaleen säteilyn ymmärtämisessä Tuomaalla oli puutteita. Hän ei osannut esimerkiksi selittää mustan kappaleen säteilyn syntyä. Lisäksi hän ei maininnut mustan kappaleen malliluonnetta. Tuomas kuitenkin vaikutti tuntevan Planckin kvanttihypoteesin. Fotonin käsitteen asemasta hän käytti tässä yhteydessä käsitettä energia-annos.

## F. Kvantittuminen

Tuomas ymmärsi kvantittumisen tarkoittavan, että suureiden arvot eivät saa jatkuvasti kaikkia mahdollisia arvoja vaan portaittain tiettyjä arvoja. Esimerkkeinä hän mainitsi energian arvojen kvantittumisen elektroniverhossa, ytimen sidosenergioiden kvantittumisen atomien ytimissä sekä magneettisten kvanttilukujen, magneettikenttien suuntien ja pyörimismäärien kvantittumisen. Tuomaan käsityksen mukaan useimmat suureista ovat kvantittuneita.

Tulkinta. Tuomas liitti kvantittumisen käsitteen lukuisiin suureisiin, kuten elektroniverhon energiaan, magneettikenttien suuntiin ja pyörimismäärään. Kaikki Tuomaan mainitsevat suureet liittyivät atomiin.

## G. Hiukkanen

Esitestissä kartoitettiin oppijoiden hiukkasen käsitteen ymmärtämistä tehtävällä, jossa kysyttiin mitä vastaaja ymmärtää hiukkasella; mitä ominaisuuksia hiukkasella on, ja miten hiukkasta voidaan kuvailla. Tuomas vastasi tehtävään seuraavalla tavalla:

”Hiukkanen on aineen rakenneosanen, jolla voi olla tiettyjä ominaisuuksia (massa, sähkövaraus ym.). Hiukkanen koostuu alkeellisemmista hiukkasista. Aineen perusrakenneosiksi sanotaan kvarkkeja ja leptoneita, joilla ei ole sisäistä rakennetta (ehkä nykyisin jo tutkitaan niidenkin rakenneosia). Hiukkasta saatetaan kuvata klassisen fysiikan tapaan kappaleeksi, jolla on tietty koko ja ehkä pallon muoto tai aaltomallin mukaan voidaan antaa todennäköisyysjakauma hiukkasen esiintymiselle.”

Tulkinta. Tuomas vaikutti ymmärtävän klassisen ja kvanttihukkasen eroavuudet pääpiirteittäin. Hiukkasen Tuomas määritteli epäsuorasti malliksi. Sanoessaan ”aaltomallin mukaan voidaan antaa todennäköisyysjakauma hiukkasen esiintymiselle” Tuomas ilmeisesti viittasi kvanttifysiikan hiukkasiin. Aaltomallin käsitteen käyttö tässä yhteydessä ei ole täsmällisesti ottaen oikein, koska yleensä sillä viitataan klassiseen aaltomalliin. Tieteellisesti hyväksyttävämpää olisi käyttää Bornin todennäköisyystulkintaa, jonka mukaan aaltofunktion amplitudin neliö on verrannollinen hiukkasen todennäköisyyteen esiintyä tietyssä pisteessä tietyllä ajanhetkellä (Born 1965, ks. myös Maalampi & Perko 2002).

## H. Fotoni

Jos Tuomaan pitäisi kertoa fotonista sellaiselle henkilölle, joka ei ole koskaan kuullut fotonista, hän sanoisi fotonin olevan ”ajateltu valohiukkanen, massaton hiukkanen, joka liikkuu valon nopeudella”. Fotonilla on myös liikemassa, ja se on tavallaan malli valon kuvailemiseen, valon hiukkasmalli. Kysyttäessä, miten Tuomas ymmärtää fotonin malliluonteen hän kertoi seuraavaa:

- Yhtä hyvin hiukkasen aaltoluonne, kun (...) sähkömagneettisen säteilyn hiukkasluonne, nii näis on tämä dualismi (...) mä en oo vieläkään mistään lukenu siihen selkeätä selitystä millä sen vois ymmärtää.

Ei-klassisista ominaisuuksista tiedusteltaessa Tuomas totesi, etteivät fotonit kuulu klassiseen fysiikkaan, jossa valoa pidetään aaltoliikkeenä. Tuomas kuitenkin arveli, että fotonin lepomassattomuus ja liikemassallisuus ovat sellaisia ominaisuuksia, joita klassinen fysiikka ei tunne.

Tiedusteltaessa miten fotoneista on saatu tietoa, Tuomas viittasi fotonikäsitteen muotoutumiseen Planckin mustan kappaleen säteilyn, Einsteinin valosähköisen ilmiön ja Comptonin sironnan kautta.

- Se oli tämä Planckin mustan kappaleen säteily taikka tämä Einsteinin esittämä valosähköisen ilmiön teoria ja Compton sironna joilla (...) tää fotoni (-) ja valon hiukkasluonteeseen on (...) päädytty (...) kai (...) useimmissa kvanttimekaniikan ilmiössä joissa (...) joudutaan sitä valoakin käsittelemään, niin ilman muuta (-) fotoneja sitten käytetään. (...) En osaa sanoa missä (...) jotain ihan oleellista tietoa tulis muuta (-) tietysti suhteellisuusteoriakin jotain tietoa siitä antaa.

Tulkinta. Tuomas määritteli fotonin valohiukkaseksi ja valon hiukkasmalliksi: malliksi, jota käytetään valon kuvailuun. Tuomas viittasi dualismilla hiukkasen aaltoluonteeseen ja sähkömagneettisen säteilyn hiukkasluonteeseen, mutta ei mielestään täysin ymmärtänyt dualismin merkitystä.

Ominaisuuksiltaan Tuomaan fotonimalli oli vaatimaton ja kaikki hänen fotoniin liittämät ominaisuudet olivat itse asiassa sähkömagneettisen säteilyn ominaisuuksia, ei aidosti fotonin. Tuomas kertoo fotonin klassisista olioista erottaviksi ominaisuuksiksi lepomassattomuuden ja liikemassallisuuden. Massan liittäminen fotonin ominaisuudeksi ei ole kuitenkaan fysiikan kannalta perusteltua.

Fotonia koskevan haastatteluosion perusteella Tuomaan fotonin ymmärryksestä saatu kuva oli vaatimaton. Tuomas kuitenkin mainitsi fotonin kvantittuneen energian mustan kappaleen säteilyn ja valosähköisen ilmiön yhteydessä. Comptonin ilmiötä selittäessään Tuomas viittasi energian ja liikemäärän säilymisen, mutta ei fotonin

liikemäärään, josta Comptonin ilmiö toimii osoituksena. Comptonin ilmiössä Tuomas sanoi fotonin luovuttavan osan energiastaan elektronille, mikä on väärä ajattelutapa.

## I. Elektroni

Elektronin ominaisuuksiksi Tuomas mainitsi negatiivisen alkeisvarauksen ja massan. Hän lisäsi elektronin kuuluvan leptoneihin ja olevan rakenteeton. Kysyttäessä onko elektronilla sellaisia ominaisuuksia, joita ei voida selittää klassisen fysiikan avulla, Tuomas kertoi seuraavaa:

- Kun se elektroni nimenomaan (...) on (...) niinkin kevyt hiukkanen, niin sillä on nää aalto-ominaisuudet (...) erityisen selvästi tullu esille. Et tuota (-) joudutaan käyttämään elektronin (...) liikkeen kuvailemiseen niin aaltomallia (...) jota ei pysty klassisen fysiikan mukaan selittämään.

Kysyttäessä miten elektroneista on saatu tietoa, Tuomas viittasi interferenssikokeisiin, joissa tulokset olivat samankaltaiset kuin valolla.

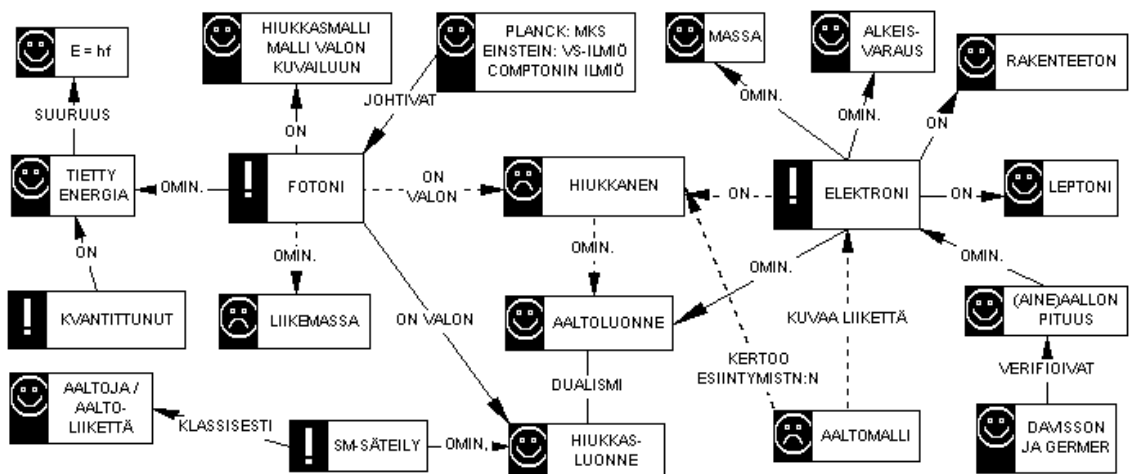
- Kokeellisesti (...) elektroni tietysti aika myöhään vasta havaittiinkin et se nyt on olemassa, mutta (...) tais olla (...) sitten (-) interferenssikokeita, että elektronisuihkuista saati samannäköisiä interferenssikuvioita kun (...) näkyvälläki valolla, jos vaan löydettiin sopivan (-) pienet rakosysteemit tai muut, että kun niiden aallonpituudet on niin paljon pienemmät, elektronien aineaallonpituudet.

Tuomas lisäsi, että television kehitystyössä keksittiin elektronisuihkun käyttö elektronimikroskoopeissa, joissa hyödynnetään elektronin aaltoluonnetta. Hän myös mainitsi, että teoreettisesti esitetyn aineaallon verifioivat kokeellisesti Davisson ja Germer.

Tulkinta. Tuomas ymmärsi, että elektronin liikettä ei voida kuvailla klassisen fysiikan avulla vaan siihen on käytettävä aaltomallia. Aaltomalliin Tuomas viittasi jo hiukkasen käsitteen yhteydessä kertoen sen antavan todennäköisyysjakauman elektronin esiintymiselle. Tuomas käytti elektronin aallonpituudesta puhuessaan synonyymiä aineaallonpituus tuntien Davissonin ja Germerin kokeen, jossa havaitaan elektronisuihkun interferenssi. Hän viittasi myös elektronien aineaallon hyödyntämiseen elektronimikroskoopeissa. Tuomaan käsitys aaltomallin käsitteestä poikkesi täten tavanomaisesta käsityksestä. Kuten jo hiukkasen käsitteen yhteydessä esitettiin, tieteellisesti hyväksyttävämpää olisi käyttää Bornin todennäköisyystulkintaa, jonka mukaan aaltofunktion amplitudin neliö on verrannollinen hiukkasen todennäköisyyteen esiintyä tietyssä pisteessä tietyllä ajanhetkellä.

## J. Tuomaan käsiteverkko esitestissä ja ensimmäisessä haastattelussa

Tuomaan elektronin ja fotonin ontologiaan liittyvien esitestin ja ensimmäisen haastattelun vastauksista muodostettua käsiteverkkoa esittää kuvio 5.2. Laajassa käsiteverkossa aaltomallin ja hiukkasen käsitteet saavat tieteen näkökulmasta virheellisen merkityksen. Lisäksi fotonin ominaisuudeksi liittyy tieteellisen käsityksen vastaisesti liikemassan käsite. Fotonin käsitteen kanssa synonyymisiä ilmaisuja ovat valon kuvailuun käytettävä malli, valon hiukkasluonne ja valon hiukkanen. Tuomaan käsitysten taustalla voidaan nähdä valon rakenneosamalli.



**Kuvio 5.2.** Tuomaan esitestin ja ensimmäisen haastattelun vastausten perusteella muodostettu käsiteverkko. Aloituskäsitteet on merkitty huutomerkillä, tieteellisen käsityksen mukaiset käsitteet positiivisella hymiöllä ja sen vastaiset negatiivisella hymiöllä. Lisäksi tieteellisen käsityksen vastaiset kytkeytyvät on osoitettu katkoviivalla.

### 5.2.2 Toinen haastattelu

Toisessa haastattelussa kartoitettiin Comptonin ilmiön ymmärtämistä Comptonin koejärjestelyä esittävän kuvion ja Comptonin sirontakokeen tuloksia esittävien kuvaajien pohjalta. Tässä vaiheessa Comptonin ilmiötä ei vielä oltu käsitelty opetuksessa. Tuomasta myös haastateltiin opetuksessa jo läpikäydystä mustan kappaleen säteilyn aihealueesta. Fotonin ja elektronin ominaisuuksista ja niihin liittyvistä suureista keskusteltiin tehtävän pohjalta, jossa on esitetty sekä fotonin ja

elektroniin liittyviä suureita ja käsitteitä, että myös sellaisia suureita ja käsitteitä, jotka eivät niihin tieteellisen käsityksen mukaan liity.

#### A. Comptonin ilmiö

Tuomaalle entuudestaan tutussa Comptonin sirontakokeessa tapahtuu röntgensäteilyn sironta hiilestä. Tuomas selitti ilmiötä röntgenfotonien<sup>45</sup> ja elektronien törmäyksellä käyttäen koejärjestelyä esittävää kuviota apuna.

- Röntgensäteet osuvat () ilmeisesti (...) hiiliatomien (-) elektroneihin, ja silloin (...) röntgenfotonit, kun ne törmäävät elektronin kanssa (...) se törmäys voi olla (...) lievempi, jolloin ne menevät (-) läpi lähes suoraan taikka sitten (...) enemmän niinku (-) kohtisuoraan siihen elektroniin sattuu se fotoni, jolloin se tulee lähes samaan suuntaan takasin (...) ne siroaa niistä elektroneista eri kulmiin, tähänhän näitä kulmia on merkattu.

Comptonin mittaustulokset sen sijaan olivat Tuomaalle tuntemattomia. Tuomas selitti havaintojaan seuraavasti:

- Kun (...) röntgensäteily menee suoraan läpi (-) niin (...) aallonpituus ei muutu paljon ollenkaan. Et (...) pienellä välillä on (-) ja sitten 45 asteen kulmassa (-) tuota aallonpituus (-) on toinen piikki tuossa tullu pitemmäks. Taikka tuohon 90 asteen kulmaan ni (-) näyttää että aallonpituuksia, näistä tulee tällasia kakspiikkisiä jakaumia, että suurimmalla osalla (-) tuosta röntgensäteilystä on (-) aallonpituus silloin (-) pienentynyt (()) matkalla. Että näkee että mitä (-) suurempaan kulmaan tuo siroaminen tapahtuu, niin sitä enemmän tuo aallonpituus pienenee (...) että oliskohan nimenomaan sitten niinku tämä toinen piikki niitä (-) sironneita aallonpituuksia. (-) Tuota en tiedä, että minkä takia se sitten tämä (-) piikki on tässä kuvassa myös (...) jos ne aallot, röntgensäteily siroaa tänne että (...) minkä takia siellä on mukana tuota alkuperäistä aallonpituutta.

Tuomas kertoi röntgenfotonin olevan hyvin suurienergiainen, jolloin sen törmätessä elektroneihin elektronien liike-energia tulee hyvin suureksi ja aiheuttaa elektronien irtoamisen atomista.

Tulkinta. Tuomas tulkitsi Comptonin ilmiötä röntgenfotonien ja elektronien törmäyksenä. Säteilyn alkuperäisen aallonpituuden esiintyminen intensiteettijakaumassa sironneen aallonpituuden lisäksi osoittautui Tuomaalle mysteeriksi.

Fysiikan teorian mukaan alkuperäinen aallonpituus aiheutuu klassisesta Thomsonin sironnasta, jossa sähkömagneettinen säteily vuorovaikuttaa sidottujen elektronien kanssa ja saa ne värähtelemään mukanaan. Tällöin sironnut säteily on värähtelevien elektronien synnyttämää säteilyä.

---

<sup>45</sup> Röntgensäteilyn aallonpituusalueen fotoni. Esimerkiksi amerikkalainen kirjallisuus nimeää fotonit säteilylajin mukaisesti.

## B. Mustan kappaleen säteily

Tuomasta pyydettiin kertomaan, millaisia ongelmia mustan kappaleen säteilyn teoriassa oli ja millaisia kokeellisia tuloksia saatiin. Hänen vastauksensa kattoi mustan kappaleen säteilijän mallin, lämpötasapainon muodostumisen ja mustan kappaleen säteilyyn liittyvät säteilylait.

- Mustan kappaleen () lämpötasapainossa se mustan kappaleen (-) säteilemä ja absorboima energia pitäis olla yhtä suuret ja tätä sitten ontelomallia (-) eilisen päivän väänsin sitä tehtävää niistä värähtelyistä (...) mutta käytännössä saatiin aina se intensiteettijakauma mittauksessa kun mittaustekniikka riittävästi kehittyi, että (...) mustan kappaleen säteilyn intensiteetti (-) aallonpituuden tai taajuuden funktiona, riippuu lämpötilasta (...) Wienin laki oli semmonen, että lyhyillä aallonpituuksilla se (-) päti, mutta (...) vähän pidemmällä ei ollenkaan (...) Rayleigh-Jeansin laki taas sitten pitkillä aallonpituuksilla, mutta sitten ennusti lyhemmillä aallonpituuksilla (-) hyvin suuria säteilyn intensiteettejä. Niitä sitten ei siellä taas tullut, kun se oli se ultraviolettikatastrofi nimeltään, että (...) sen mallin antamat (-) säteilyennusteet olis pitäny olla suuria siellä ultraviolettialueella, mut niitä (-) ei kokeissa sellasia saatu (...) Planckin säteilylaki (...) onnistui selittämään (...) tuon mustan kappaleen lähettämän säteilyn, () että sen Planckin lain mukaiset tulokset olivat sopuissuissa kokeellisten tulosten kanssa.

Kysyttäessä miten Planck onnistui yhdistämään teorian ja kokeelliset tulokset, Tuomas viittasi tämän postulaattiin.

- Aine (-) ei voi emittoida (-) säteilyä (...) ihan (-) miten tahansa vaan tietyn suuruisina energia-annoksina (...) aina se (-) säteilyn energia on tuota, Planckin vakio kertoo taajuus. Elikkä se (...) postulaatti (...) soveltamalla sitä siihen teoriaan niin saatiin se kaava (-) johdettua.

Tiedusteltaessa mikä mustan kappaleen säteilyssä kvantittuu, Tuomas liitti vastauksensa sähkömagneettisen säteilyn energiaan.

- Siinä on (...) tää (-) valon (-) energia, että (...) sähkömagneettisen säteilyn (-) energia ja ehkä sen sitte jos sitä ajatellaan tämmösenä (...) dipolivärähtelijänä, joka emittoi säteilyä nii (...) se voi emittoida vaan tiettyjä (-) taajuuksia. (-) Miten mä nyt sen sanosin (...) valo syntyy vaan tietyn suuruisina energia-annoksina (-) se kai se kvantittuminen on siinä.

Tulkinta. Tuomas hallitsi toisessa haastattelussa mustan kappaleen säteilylait kvalitatiivisesti. Mustan kappaleen säteilyn syntyä selittäessään Tuomas soveltsi dipolivärähtelijämallia, jota ei kuitenkaan tarkemmin selittänyt. Mustan kappaleen säteilyn syntyminen voidaan selittää olettamalla mustan kappaleen koostuvan materiaalisista oskillaattoreista tai värähtelijöistä, joiden värähtelyiden energia on

kvantittunutta. Seisovan aaltoliikkeen muodostumisen selitys puuttui kuitenkin Tuomaan vastauksesta.

### C. Fotoni

Tuomas kertoi, ettei fotonilla ole lepomassaa, mutta sillä on energiasta johtuen liikemassaa. Hän lisäsi, että fotonin energian suuruus on Planckin vakion ja taajuuden tulo, ja muisteli fotonin liikemäärän riippuvan Planckin vakioista.

- *Minkä suuruinen fotonin liikemäärä on?*

- No tuota (-) mikähän se nyt oli sen (-) lauseke (...) Planckin vakiohan siinä oli ja sitte (-) aaltoluku tai jotaki, sehän on aika pieni homma johtaa se tarvittaessa.

- *Eikö sille fotonille ei voida käyttää sitä klassista liikemäärän lauseketta?*

- Ei voida.

- *Minkä takia ei voida?*

- No sen takia kun sen fotonin nopeus on valon nopeus (-) ja klassinen mekaniikka ei siihen päde, että siinä käytetään fotonin liikemassaa.

Tuomaan mukaan fotoni liikkuu aina valon nopeudella, ja fotonia pidetään sekä aaltoliikkeenä että sähkömagneettisena säteilynä, joten fotonin liittyy aaltoluonne. Hän määritteli fotonin kuvaavan valon hiukkasluonnetta dualismin mukaisesti. Tuomas myös lisäsi, että fotoneilla on myös paikka, mikäli valon ajatellaan koostuvan fotoneista.

- Kun fotonit etenee pisteestä A pisteeseen B, niin kyllä sen pitää mennä (-) joittenkin paikkojen kautta sinne (...) missä määrin tämmöset fotonit - fotoneita oikeesti on olemassa - niin siitäkin kun ei ihan varma oo että (...) miten ne pitää ymmärtää. (-) Tämöinen dualismin malli, että (...) silloin aina nopeutena se valon nopeus ja siitä ei jotenki yhtä selvästi (-) paikkaa liitä kun mitä johonkii (...) hiukkasiin, jotka (...) voivat vaikka pysähtyäkin.

Tuomaan mukaan aallonpituus ja taajuus ovat fotonin ominaisuuksia, ja oletettaessa sähkömagneettisen säteilyn koostuvan fotoneista fotoneilla on amplitudikin.

- Aallonpituus [fotonilla] tietysti on ja (-) taajuus (...) silloin kun sähkömagneettisessa säteilystä sanotaan se koostuu fotoneista ni, onhan (...) niillä aalloilla silloin amplitudikin.



Tulkinta. Tuomas perusteli fotonin liikemassaa fotonin energialla, jonka suuruus on Planckin vakion ja taajuuden tulo. Hän kertoi Planckin vakion ja fotonin liikemassan esiintyvän fotonin liikemäärän lausekkeessa. Tämän kaltaisen käsityksen taustalla voi olla joissakin lukion oppikirjoissa esitettävä, tieteellisesti hieman kyseenalainen de Broglien hypoteesien johto, joka perustuu oletukselle fotonin massallisuudesta. Mikäli fotoniin halutaan liittää massan käsite, tulisi se ymmärtää hitautena. Yksinkertaisinta on kuitenkin ajatella fotoni massattomaksi hiukkaseksi.

Tuomaan käsitys fotonin aalto- ja hiukkasluonteesta vaikutti naiivilta dualismilta, jonka mukaan valo on samanaikaisesti sekä aaltoja että hiukkasia. Perustellessaan fotonien aalto-ominaisuuksia tämä esitti sähkömagneettisen säteilyn tai valon koostuvan fotoneista. Tätä historiallista, Einsteinin valokvanttihypoteesiin pohjautuvaa mallia kutsutaan säteilyn tai valon rakennesomalliseksi. Nykykäsityksen mukaan sähkömagneettisen säteilyn ei ajatella koostuvan fotoneista, vaan fotonit ilmenevät säteilykentän ja materian välisessä vuorovaikutustapahtumissa. Fysiikan näkökulmasta kvantti-ilmiöiden perusteella voidaan tehdä eksistenssiväitteitä fotonin ominaisuuksista.

#### D. Elektroni

Tuomas kertoi, että elektronilla on lepomassa ja alkeisvarauksen suuruinen sähkövaraus. Hänen mukaansa elektronin energia voi olla massan sisältämää energiaa tai lepoenergiaa sekä elektronin liikkuessa liike-energiaa ja kokonaisenergiaa. Kysyttäessä liittyvätkö elektroni ja sähkömagneettinen säteily toisiinsa, Tuomas kertoi sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismista.

- No kyllä sillä tavalla, että kun elektroni on kiihtyvässä liikkeessä, niin silloin se (-) synnyttää sähkömagneettista säteilyä. Ja tietysti sitten tää toinen (-) tai (-) modernimman fysiikan selitys, että kun elektroni elektroniverhossa sitoutuneena on, niin kun se siirtyy energiatasolta toiselle, niin niihin energiaeroihin liittyy sähkömagneettinen säteily.

Tuomas määritteli elektronin liikemäärän elektronin massan ja nopeuden tuloksi lisäten, että elektronin nopeuden ollessa suuri elektronin liikemäärän laskemiseen on käytettävä suhteellisuusteoriaa. Elektronin nopeus oli Tuomaan mukaan valon nopeutta pienempi elektronin lepomassan vuoksi, joten suhteellisuusteorian mukaan se ei voi saavuttaa valon nopeutta. Tuomaan mukaan dualismi pätee myös elektronille.

- Ja aallonpituus pystytään aineaaltoteorian mukaan laskemaan, et se riippuu elektronin nopeudesta. Ja jos sitä aaltoliikkeenä pidetään, et sillä on nopeus ja aallonpituus, nii aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan varmaan silloin voidaan taajuuskin laskea ja (-) aina sitten aaltoon liittyy myös amplitudi. Et nekin sillä on on jos aallosta puhutaan.

Tuomas liitti elektronin paikkaan Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen ja todennäköisyystulkinnan:

- Ja elektronin paikka on tietysti aina olemassa, tietysti ehkä joku Heisenbergin epätarkkuusperiaate voi sanoa että, että miten tarkasti se [elektroni] on määrätty hiukkasena, tietysti myös (...) aaltomekaanisessa kuvauksessa ni annetaan vaan joku todennäköisyysjakauma (-) elektronin sijainnista, jolloin silloin se paikka on vaikea sanoa.

Tulkinta. Tuomaan mukaan elektronin energia voi olla massan sisältämää energiaa, lepo-, liike- tai kokonaisenergiaa. Hänen vastauksestaan ei kuitenkaan tarkemmin käynyt ilmi, miten hän ymmärtää niiden liittyvän elektroniin. Näistä energian lajeista kaksi ensimmäistä viittasivat Tuomaan käsityksissä ilmeisesti suhteellisuusteoriaan. Kaksi viimeistä energian muotoa voidaan liittää elektroniin sen ollessa sähkökentässä.

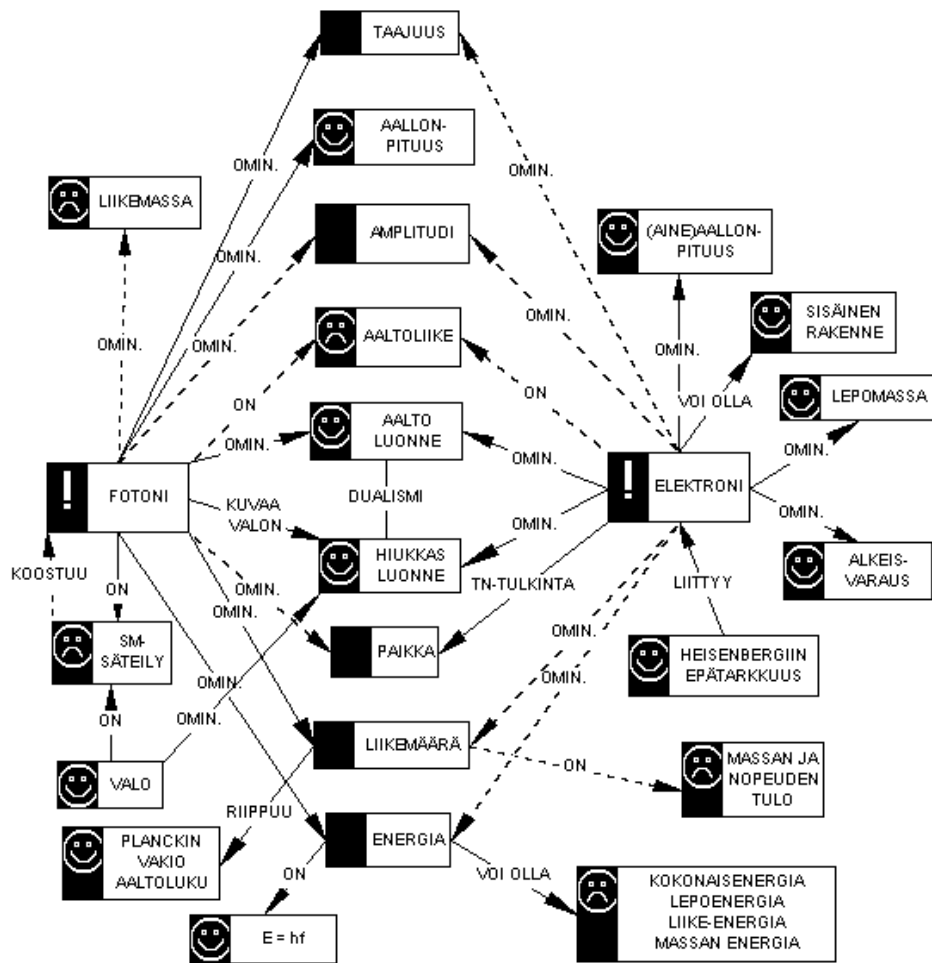
Tuomas ymmärsi, että elektroni ja sähkömagneettinen säteily liittyvät toisiinsa sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismien kautta. Tässä yhteydessä Tuomas viittasi elektronin energiatasoihin. Tuomas ilmaisi elektronin liikemäärän klassisella yhtälöllä, mutta käsitti tarpeen suhteellisuusteorian soveltamiselle elektronin nopeuden ollessa suuri. Tuomas yhdisti myös dualismin käsitteen elektroniin. Hänen käsityksensä elektronin aaltoluonteesta oli kuitenkin hieman sekava ja toteamus ”jos sitä [elektronia] aaltoliikkeenä pidetään” ontologisesti arveluttava. Tuomas viittasi elektronin aallonpituuden laskemiseen aineaaltoteorian avulla, mutta mainitsi, että elektronin taajuus voidaan laskea aaltoliikkeen perusyhtälön avulla. Fysiikan näkökulmasta tämä ei pidä paikkaansa, koska aaltoliikkeen perusyhtälö pätee vain klassiselle aaltoliikkeelle.

Tuomas tulkitsi Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen kertovan, miten tarkasti elektroni on määritelty hiukkasena. Tuomaan tulkinta poikkeaa epätarkkuusperiaatteen yleisimmin käytetystä tieteellisestä tulkinnasta, jonka mukaan epätarkkuusperiaate kertoo rajan, jota tarkemmin hiukkasen paikkaa ja liikemäärää ei voida samanaikaisesti määrittää (Heisenberg 1965). Aaltomekaniikan antaman elektronin paikan todennäköisyysjakauman Tuomas ymmärsi merkitsevän sitä, että paikka on vaikea sanoa. Tuomaan sanontatapa oli hieman epämääräinen, joten sen perusteella ei voi tehdä johtopäätöksiä siitä, ymmärsikö Tuomas todennäköisyystulkinnan merkitystä.

#### E. Tuomaan käsiteverkko toisessa haastattelussa

Tuomaan elektronin ja fotonin ontologiaan liittyvien toisen haastattelun vastauksista muodostettua käsiteverkkoa esittää kuvio 5.3 (s.119). Kuviota tarkastelemalla havaitaan Tuomaan elektroni- ja fotonikäsitusten symmetrisyys. Tässä käsiteverkossa ilmenee useita virheellisesti toisiinsa kytkeytyneitä käsitteitä.

Tuomas tulkitsee dualismia siten, että fotonit ja elektronit ovat sekä hiukkasia että aaltoliikettä. Lisäksi hänen mukaansa elektronin taajuus voidaan laskea aaltoliikkeen perusyhtälön avulla ja elektronin aineallonpituus aineaaltoteorian avulla. Tuomalle ongelmallinen fotonin ja sähkömagneettisen säteilyn käsitteiden eriytymättömyys sekä fotonien pitäminen sähkömagneettisen säteilyn rakenneosina ilmenevät myös käsitteverkkoa tarkastelemalla.



**Kuvio 5.3.** Tuomaan toisen haastattelun vastausten perusteella muodostettu käsitteverkko. Aloituskäsitteet on merkitty huutomerkillä, tieteellisen käsityksen mukaiset käsitykset positiivisella hymiöllä ja sen vastaiset negatiivisella hymiöllä. Mikäli käsite liittyy hyväksyttävällä tavalla vain toiseen kvanttiolioon, on kuviossa käytetty symbolitonta laatikkoa. Lisäksi tieteellisen käsityksen vastaiset kytkeytymiset on osoitettu katkoviivalla.

### 5.2.3 Kolmas haastattelu

Kolmanteen haastatteluun mennessä kurssin opetuksessa on läpikäyty mustan kappaleen säteily, valosähköinen ilmiö, Comptonin ilmiö ja kaksoisrakokoe. Kolmas haastattelu toteutettiin STR–menetelmää soveltaen: Tuomaalle kerrottiin, mitä hän sanoi tarkasteltavasta aiheesta ensimmäisessä haastattelussa, ja häntä pyydettiin kommentoimaan vastaustaan. Haastattelussa käsiteltäviä aiheita olivat hiukkanen, elektroni, fotonit ja kvantittuminen.

#### A. Hiukkanen

Tuomas kertoi ensimmäisessä haastattelussa, että hiukkasen käsite voidaan ymmärtää dualismin toiseksi malliksi, hiukkasmalliksi. Kolmannessa haastattelussa hän kertoi oppineensa kurssin aikana, että [kvanttifysiikan] hiukkaset voidaan tulkita myös kentän kvanteiksi. Hiukkasilla on Tuomaan mukaan duaaliset ominaisuudet.

- Näitten opetusten aikana on oppinu sen, että näitä hiukkasia voidaan (...) pitää (...) kentän kvanteina myös, että (...) tämmöset dualistiset ominaisuudethan niillä on, kuvailemiseen on, (-) että en osaa sen kummemmin muuta sanoa.

Haastattelijan pohtiessa ymmärtääkö Tuomas hiukkaset kahdentyypisiksi, konkreettisiksi ja vähemmän konkreettisiksi, tämä selitti kaikkien hiukkasten olevan yhtä konkreettisia; kvantti- ja aalto-ominaisuudet vain tulevan paremmin esiin hiukkasen koon pienentyessä.

- Varmaan ne kaikki ovat (...) ihan konkreettisia, mutta ehkä se, että (...) mitä pienempi hiukkanen ni sitä enemmän ne (...) kvanttiominaisuudet ja nuo (...) tulevat näkyviin, ja aalto-ominaisuudet.

Tulkinta. Tuomas kertoi omaksuneensa selitysmallin, jossa kvanttifysiikan hiukkaset tulkitaan kentän kvanteiksi. Hänen mukaansa kaikki hiukkaset ovat olemukseltaan yhtä konkreettisia, kvantti- ja aalto-ominaisuudet tulevat selkeämmin esiin hiukkasten koon pienentyessä. Tätä tulkintaa käyttävät myös Maalampi & Perko (2002). Tulkinta on vain osaksi totta, koska esimerkiksi verraten suurikokoisten natriumatomien on havaittu diffraktoituvan kaksoisrakokokeessa (ks. esimerkiksi Martin et al. 1987).

## B. Elektronit

Tuomas kertoi ensimmäisessä haastattelussa elektronin kuuluvan leptoneihin ja olevan rakenteeton. Kolmannessa haastattelussa hän kuitenkin esitti, että elektronilla voi olla sisäinen rakenne, mutta tiede ei ole sitä vielä onnistunut osoittamaan. Tuomaan mukaan aaltomalli on hiukkasmallia sopivampi elektronin kuvaamiseen.

*- Sanoit myös, että siihen elektroniin liittyy aalto-ominaisuuksia ja sen liikettä voidaan kuvata aaltomallilla ja siihen liittyy myöskin aineallan pituus. Tästä kerroit elektronimikroskoopin esimerkkinä. Ja mainitsit Davisson-Germer kokeen ja sitten kerroit myös siitä, miten tää hiukkasmalli liittyy elektroniin, että se kuvataan pieneksi palloksi. Aaltomallista sanoit, että niitä elektroniverhoja kuvataan sumun näköisinä alueina joissa elektroni jollakin todennäköisyydellä on.*

*- Ehkä enemmän vielä elektronin kuvaamisessa tää aaltomalli nyt sitten tuntuu järkevämmältä, ehkä sen takia et kun se on pienempi hiukkanen (...) atomin ytimen rakenneosia ei aaltomalleilla esitetä mut elektroniverhoa esitetään.*

Tulkinta. Tuomas perusteli aaltomallin sopivuutta elektronin kuvaamiseen elektronin pienellä koolla. Hänen mukaansa atomin ytimen rakenneosia ei kuvata aaltomalleilla, mutta tieteellisen käsityksen mukaan Schrödingerin yhtälöä voidaan soveltaa kaikille massallisille kvanttifysiikan hiukkasille. Tuomaan käsitys aaltomallin liittymisestä elektroniin on linjassa Tuomaan hiukkasen käsitteen yhteydessä esille tulleen käsityksen kanssa, jonka mukaan aalto- ja kvanttiluonteen ilmeneminen on verrannollinen olion kokoon.

Tuomas sovelsi edelleen aaltomallin käsitettä elektronin yhteydessä, vaikka hän ei varmaankaan tarkoittanut klassista aaltomallia vaan niin sanottua aineaalteoriaa, koska viittasi jo ensimmäisessä haastattelussa aaltomallin antavan hiukkasen esiintymisen todennäköisyyden. Tieteellisesti suositeltavampi käsite tässä yhteydessä olisi aaltofunktion käsite.

## C. Fotoni

Tuomas kertoi, että hän on kurssin aikana kuullut valon olevan aaltoliikettä, jonka vuorovaikutus aineen kanssa tapahtuu kvantteina, jolloin etenevän valon ei voida ajatella koostuvan hiukkasista. Tuomaan ajatukset olivat ristiriitaisia.

*- Saattaa olla, että oon kuullu (...) mielipidettä, että (-) valo onkin vaan kuitenkin ehkä enemmän aaltoliikettä, mutta nimenomaan sitten vuorovaikutus aineen kanssa vaan tapahtuu kvantteina, ja (...) ettei valoo voiskaan pitää semmosina hiukkasina silloin kun se () etenee. Mutta (...) joskus oon kuullu opettavan tätä dualismia niin, että (-) valoa*

(...) voi pitää fotoneina, semmosina valohiukkasina, että (...) en osaa (...) varmaks sanoa että miten (-) asia oikeesti on.

Ensimmäisessä haastattelussa Tuomas puhui fotonista mallina. Kolmannessa haastattelussa tiedusteltaessa fotonin olemuksen luonnetta, hän perusteli fotonin reaalisuutta sen ilmenemisenä vuorovaikutuksessa aineen kanssa.

*- Sie sanoit että fotoni on malli, tai näin mie ymmärsin, että se on malli valon kuvailemiseen. Onko se nyt malli vai onko se jotakin mitä oikeesti on olemassa?*

- Kaikki tietysti mitä fysiikan teoriassa (...) ilmiötä kuvataan, nii ne ovat aina malleja siitä todellisuudesta (...) että minkälaista se valo on, nii varmaan nii sen kuvaileminen saattaa (-) satojen vuosien kuluttua olla (...) vielä kehittyneempää ja siitä on otettu vielä paremmat mallit käyttöön. Mutta (-) fotoni, tai (...) valokvantti, on varmaan (...) todellinen, jos se kerta vuorovaikutuksessa aineen kanssa ilmenee semmosena, että se energia on (-) Planckin vakio kertaa taajuus ja (...) se on sillon totta että se on niin.

Tulkinta. Tuomas koki kognitiivisen ristiriidan aiemman fotonimallinsa ja kurssin aikana rakentuneen uuden fotonimallin välillä. Kognitiivinen ristiriita ei vaikuta ratkenneen. Fotonin reaalisuudesta Tuomas piti osoituksena aineen ja säteilyn välisen vuorovaikutuksen kvantittuneisuutta, jossa fotonin energia on Planckin vakion ja taajuuden tulo. On vaikea tehdä johtopäätöksiä siitä, mieltääkö hän fotonin enää malliksi kuten kurssin alussa.

#### D. Kvantittuminen

Kvantittumisen käsitteeseen Tuomaksella ei ollut juuri lisättävää. Hän totesi, että mikrotasolla suureet ovat ilmeisesti kvantittuneet, minkä vuoksi on otettu käyttöön kvanttimekaniikka.

Tulkinta. Tuomas vaikutti ymmärtävän kvantittumisen olevan mikromaailmaan suureiden ominaisuus.

#### 5.2.4 Lopputesti ja neljäs haastattelu

Tutkimuksen kannalta kiinnostavat aiheet loppukokeessa ja neljännessä haastattelussa löytyvät taulukosta 5.12 (s. 123). Loppukokeen ja neljännen haastattelun tuloksia käsitellään yhdessä, koska haastattelu toteutettiin heti loppukokeen jälkeen, eikä käsitysten katsota merkittävästi muuttuneen näiden ajankohtien välillä.

Tuomas lisäksi määritteli loppukokeessa de Broglien relaation ja Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen, mutta ei viitannut niiden yhteydessä elektroniin tai fotonin

vaan puhui yleisesti hiukkasista. Tämän vuoksi hänen vastauksiaan mainittuihin aiheisiin ei käsitellä tässä yhteydessä.

**Taulukko 5.12.** Aiheet loppukokeessa ja neljännessä haastattelussa. x = aihe esiintyi testissä tai haastattelussa.

AIHE	Lopputesti	Haastattelu 4
Mustan kappaleen säteily	x	
Valosähköinen ilmiö		x
Comptonin ilmiö		x
Elektroni	x	
Fotoni		x
Dualismi	x	

#### A. Mustan kappaleen säteily

Mustan kappaleen säteilyn hallintaa kartoitettiin loppukokeessa tehtävällä, jonka aiheena olivat mustan kappaleen säteilylait. Tuomaan vastaus sisälsi mustan kappaleen ja mustan kappaleen säteilyn määritelmät.

”Musta kappale on sellainen, että se absorboi kaiken siihen kohdistuneen säteilyn. Siksi sen pitää olla itse ideaalinen säteilijä, ettei sen lämpötila nousisi ympäristöään korkeammaksi. Mustasta kappaleesta lähtevä säteily on lähtöisin aineesta itsestään ja siksi sen tutkiminen oli tärkeää. Ontelomallissa on esim. metallikappaleeseen tehty tyhjä tila, jossa ontelon seinämät emittoivat ja absorboivat säteilyä s.e. vallitsee terminen tasapaino. Jos ontelon seinämään on tehty pieni reikä, sieltä tuleva säteily on mustan kappaleen säteilyä.”

Tuomas kertoo lisäksi Planckin kvanttihypoteesista, jonka mukaan mustan kappaleen säteily voi emittoitua vain tietyn suuruisina energiakvantteina.

”Kokeellisille tuloksille antoi selityksen Max Planck. Hän esitti, että säteily voi emittoitua vain tietyn suuruisina energiakvantteina  $E = hv$ . Kvantin energia riippuu vain taajuudesta, sillä  $h$  on vakio. Näin johdettu intensiteettijakauman yhtälö oli sopuinnassa kokeellisten tulosten kanssa. Planckin kvanttihypoteesia kehitti edelleen Albert Einstein ja hän käytti valokvantin l. fotonin ajatusta valosähköisen ilmiön selittämiseen. Planckin säteilylaki antoi selityksen, miksi mustaan kappaleeseen ei sitoudu energiaa pienillä aallonpituuksilla: kvantin energia on tällöin niin suuri, että se ei voi absorboitua.”

Tulkinta. Tuomaan loppukokeessa esittämä tietämys mustan kappaleen säteilystä oli oleellisesti samanlainen kuin hänen toisessa haastattelussa esille tuoma tietämyksensä. Tuomas hallitsi melko hyvin mustan kappaleen säteilyn aiheen. Hän viittasi lämpötasapainon muodostumiseen perustellessaan mustan kappaleen ideaalisuutta, mutta ei maininnut seisovan aaltoliikkeen muodostumista mustan kappaleen sisälle.

Mustan kappaleen säteilyn tutkijoita kiinnostava ominaisuus oli juuri mustan kappaleen ideaalisuus säteilyn absorboimisessa ja emittoimisessa. Ilmeisesti Tuomas viittaa ilmaisulla ”mustasta kappaleesta lähtevä säteily on peräisin siitä itsestään” siihen, ettei musta kappale heijasta lainkaan säteilyä.

## B. Elektroni ja fotonit

Elektronin ja fotonin ymmärtämistä kvanttiolioiksi selvitettiin tehtävällä, jossa tuli verrata elektronia ja fonia klassisiin olioihin ja kertoa niiden ominaisuuksista.

”Klassisilla hiukkasilla on koko, massa, paikka tietyllä hetkellä ja esim. nopeus. Kaksi eri hiukkasta ei voi olla yhtä aikaa samassa paikassa. Klassiset hiukkaset ovat identifioitavissa, esim. vuorovaikutuksissa ja törmäyksissä voidaan seurata tiettyä hiukkasta. Elektronia ja fonia kvanttiolioina voidaan kuvata aaltomallin avulla. Tällöin olioilla ei ole tiettyä paikkaa, vaan esim. aallon edetessä se ilmenee laajassa avaruuden osassa. Elektronille atomissa ei voi sanoa mitään tiettyä paikkaa, vaan voidaan vaan ilmoittaa sen tila ja todennäköisyysjakauma sen esiintymisestä. Kvanttiolioita ei voi identifioida, vaan useamman elektronin tai fotonin kohdatessa näkyy niiden interferenssi. Elektronin ja fotonin voidaan liittää sekä aalto- että hiukkasominaisuuksia. Aaltoominaisuuksia ovat esim. taajuus ja aallonpituus. Hiukkasominaisuuksia massa (fotonilla on liikemassa vaikka sen lepomassa on 0), liikemäärä, energia.”

Lisäksi Tuomas viittasi fotonin ja elektronin Comptonin sirontakaavaa ja Einsteinin valosähköisen ilmiön kaavaa selittäessään.

”Compton havaitsi, että röntgen- tai UV-säteilyn sirotessa esim. hiilikohtiosta, esiintyi sironneessa säteilyssä alkuperäisen aallonpituuden (Thomsonin sironta) lisäksi toinen aallonpituus, joka oli sitä suurempi, mitä suurempi oli sirontakulma. Compton selitti tämän ilmiön niin, että fotonilla on energian  $h\nu$  lisäksi liikemäärä ja fotonin ja elektronin törmäystä voi pitää kimmoisana.”

”Einstein selitti valosähköisen ilmiön niin, että yksi valokvantti irrottaa yhden elektronin. Osa kvantin energiasta  $E = h\nu$  kuluu irrotustyöhön  $W_0$  ja loppuosa jää elektronin liikeenergiaksi.”

Tulkinta. Tuomas ymmärsi klassisen hiukkasominaisuudet. Hän kertoi, että elektronia ja fonia voidaan kuvata aaltomallin avulla, jolloin niillä ei ole tiettyä paikkaa, vaan ”aalto ilmenee laajassa avaruuden osassa”. Tuomaan käyttämä malli vaikutti kuitenkin klassiselta aaltomallilta.



On totta, että kvanttiolioita eivät ole identifioitavissa, kuten Tuomas sanoikin, mutta se ei liity elektronin ja fotonin interferenssiin, johon Tuomas viittasi samassa lauseessa. Elektroneilla ja fotoneilla ei ole yksilöidentiteettiä, pelkkä laji-identiteetti. Tuomas liitti yhä liikemassan käsitteen fotoniin.

Tuomas esitti hyväksyttävästi klassisen aaltomallin ja hiukkasmallin ominaisuudet. Elektronin yhteydessä hän viittasi elektronin tilaan ja esiintymisen todennäköisyysjakaumaan, mutta ei selostanut tarkemmin käsitteiden merkitystä.

Tuomaan Comptonin ilmiön selityksessä käyttämä fotonin ja elektronin kimmoisan törmäyksen malli oli pysynyt ennallaan. Vieläkin vaikutti siltä, että hän ei ajattele törmäystä mallina vaan todellisena törmäyksenä.

### C. Dualismi

Tuomaan näkemyksen mukaan aalto- ja hiukkasmalli kuvaavat valon ja ainehiukkasten käyttäytymistä.

”Valon ja ainehiukkasen käyttäytymistä voidaan kuvata kahdella keskenään ristiriitaiseltakin vaikuttavalla mallilla: aaltomalli ja hiukkasmalli. Esim. valon käyttäytyminen voidaan selittää aaltomallin avulla, mutta joissakin ilmiöissä (vuorovaikutus aineen kanssa) aaltomalli ei riitä, vaan valoa on pidettävä smg-kentän kvanttina jolla on tietty energia ja liikemäärä. Nämä kaksi mallia ovat toisiaan täydentäviä (komplementaarisuusperiaate).”

Tulkinta. Tuomaan ymmärrys dualismista oli tyydyttävä. Tämän vastauksen ja aiempien tehtävien perusteella voidaan sanoa, että Tuomas ymmärsi, että sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutus materian kanssa on kvantittunut ja vuorovaikutuksen kvantittuminen on juuri valon hiukkasluonne. ”Valoa pidetään kvanttina” on kuitenkin ontologisesti väärä sanontatapa ja viittaa mielikuvaan fotoneista sähkömagneettisen säteilyn rakenneosina.

### D. Valosähköinen ilmiö

Haastattelussa Tuomasta pyydettiin kertomaan valosähköisestä ilmiöstä. Hän kertoi klassisen fysiikan kohtaamasta ongelmasta ja kvanttifysiikan siihen tuomasta ratkaisusta.

- Valosähköisessä ilmiössä (-) valo (...) irrottaa elektroneja jostakin, esimerkiksi metallin pinnasta (...) olikohan Hertz ensimmäinen joka keksi tämän ilmiön, huomasi että (...) valo (...) aiheutti tuon ilmiön ja klassisen fysiikan mukaan (-) ajateltiin että (...) kun se valo siihen kohdistuu ja antaa energian, elektronit keräävät sitä energiaa ja irtoavat siitä (...) ei osattu selittää niitä havaintoja mitkä siinä oli että (-) kun mitattiin näiden irronneiden elektronien maksimienergia, niin se ei riippunutkaan tästä valon intensiteetistä.

Ja sitten jos (...) käytettiin tiettyä aallonpituutta, joka kohdistettiin siihen (...) levyille (...) vaihdeltiin sitä aallonpituutta taikka taajuutta, ni se vaikutti näitten irronneitten elektroneitten () energiaan (...) tätä ei aluks osattu selittää ollenkaan mutta sitten Einstein esitti tään valosähköisen ilmiön selityksen, että (-) valo absorboituu (...) energia-annoksina, kvantteina, sillä tavalla että kvantin energia on Planckin vakio kertaa taajuus (-) ja tuota se yks kvantti, jos sillä on vaan riittävän suuri energia, nii irrottaa yhden elektronin ja osa siitä kvantin energiasta menee irrotustyöksi ja loppu ilmenee sen elektronin liike-energiana.

Tuomas arveli valosähköisen ilmiön osoittavan valon hiukkasluonteen eli valon absorboituvan kvantteina vuorovaikutuksessa aineen kanssa.

Tulkinta. Tuomaan valosähköisen ilmiön määritelmä oli laaja, kattava ja virheetön. Vastauksensa perusteella Tuomas ymmärsi vuorovaikutuksen kvantittumisen.

#### E. Comptonin ilmiö

Tuomaalta kysyttiin Comptonin ilmiötä ja sen merkitystä.

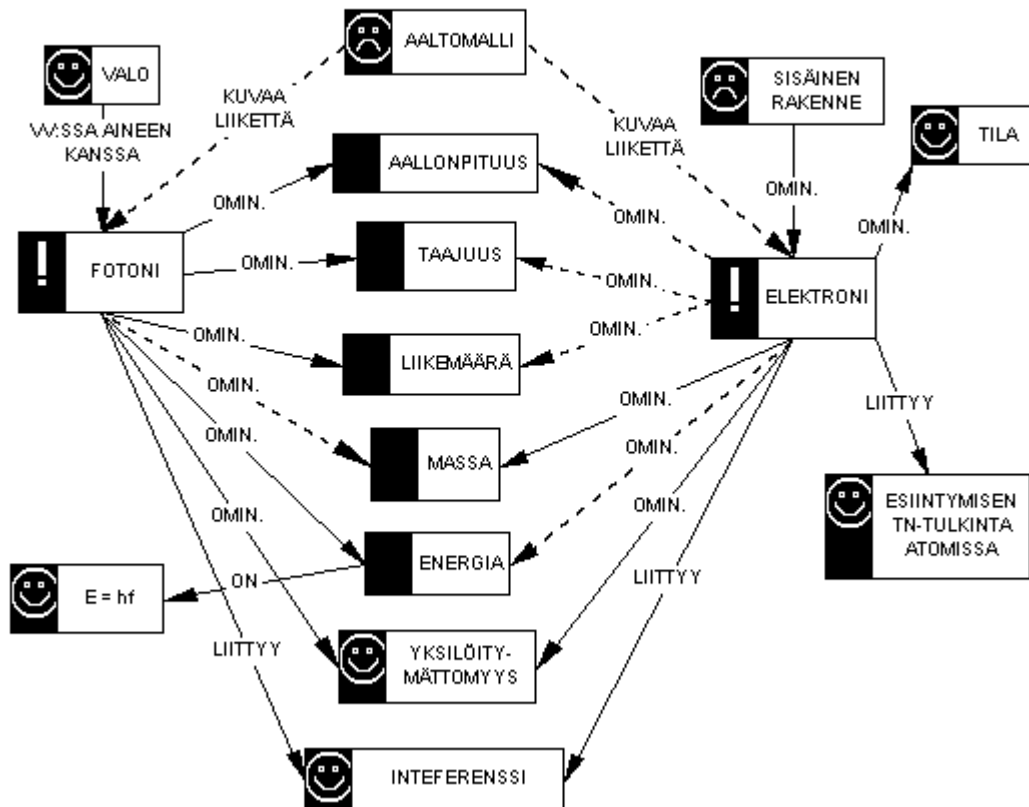
- Suurienerginen sähkömagneettinen säteily, röntgensäteily esimerkiksi, (...) kohdistuu (...) vaikka (-) hiililevyyn taikka ohueen, kevyeen (...) aineeseen (...) nii sitä säteilyä siroaa siitä aineesta eri suuntiin (...) tässä (-) on mahdollista tapahtuu se Thomsonin sironta, joka (...) selitetään näin, että se (-) säteilykvantti absorboituu ikään kuin siihen aineeseen ja sit samantien emittoituu, jolloin sen taajuus ei muutu, et se vaan muuttaa suuntaan sitten. Ja tämmönen tapahtuu varmaankin sillon jos se (...) elektroniverhon elektroni, joka sen sirottaa, niin jää vielä sinne (-) atomiin. Mutta Compton sironnassa (...) tää fotonin (...) aiheuttaa sen elektronin irtoamisen ja (...) se fotonin taajuus () muuttuu, joka siroaa tässä Compton sironnassa, että sen aallonpituus tulee sitä pitemmäks mitä suurempaan kulmaan se on sieltä sironnu. Ja Comptonin sirontaa ei klassisen fysiikan mukaan (...) pystytty ymmärtämään, mutta (...) käyttämällä siihen sen fotonin ja elektronin (...) vuorovaikutukseen (...) hiukkasten törmäysperiaatetta, energian säilymlakia ja liikemäärän säilymlakia, (...) pystyttiin johtamaan (...) aallonpituuden muutokselle ja sen sille suuntariippuvuudelle nii (-) tarkka (-) yhtälö joka näytti pätevän. Ja tää Comptonin ilmiö (...) sen merkitys on just se, että se todistaa että, että fotonilla on liikemäärä.

Tulkinta. Tuomas ymmärsi myös Comptonin ilmiön kokonaisuutena hyvin. Nyt hän tulkitsi Comptonin sironnan fotonin ja elektronin vuorovaikutustapahtumaksi, jossa tuleva foton absorboituu ja sironnut fotonin emittoituu, eikä nojaa enää ilmiötä selittäessään kimmoisan törmäyksen malliin, jossa tuleva ja siroava fotonit ovat samat oliot. Kimmoisan törmäyksen mallia, jota Tuomas kutsui ”hiukkasten törmäysperiaatteen” hän sovelsi selittäessään Comptonin sirontakaavan johtamista. Vastauksensa perusteella Tuomas ymmärsi sekä Comptonin ilmiön että sirontakaavan

merkityksen. Klassisen Thomsonin sironnan selityksessä ei ole tarpeen käyttää kvanttimallia.

#### F. Tuomaan käsiteverkko kurssin lopussa

Tuomaan elektronin ja fotonin ontologiaan liittyvien lopputestin ja neljännen haastattelun vastauksista muodostettua käsiteverkkoa esittää kuvio 5.4. Tuomas ymmärsi fotonin ja elektronin edelleen ominaisuuksiltaan samankaltaisiksi olioiksi. Tuomas sovelsi virheellisesti aaltomallin käsitettä. Hyväksyttävästi hän mainitsi yksilöitymättömyyden ja interferenssi-ilmiön.



**Kuvio 5.4.** Tuomaan lopputestin ja neljännen haastattelun vastausten perusteella muodostettu käsiteverkko. Aloituskäsitteet on merkitty huutomerkillä, tieteellisen käsityksen mukaiset käsitykset positiivisella hymiöllä ja sen vastaiset negatiivisella hymiöllä. Mikäli käsite liittyy hyväksyttävällä tavalla vain toiseen kvanttiolioon, on kuviossa käytetty symbolitonta laatikkoa. Lisäksi tieteellisen käsityksen vastaiset kytkeytymiset on osoitettu katkoviivalla.

### 5.2.5 Tuomaan suhtautuminen kurssiin

Tuomaan kurssiin suhtautumisen arviointi perustuu pääosin palautekyselyn vastauksiin ja kommentteihin. Lisäksi hän kommentoi joitakin kurssiin liittyviä seikkoja myös viimeisessä haastattelussa.

#### A. Kurssin sisältö ja taso

Tuomas oli tyytyväinen kurssin työmäärään ja sisältöön. Hän koki saaneensa valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita.

Tuomas arveli, että hänen näkemyksensä kvanttifysiikasta on jonkin verran muuttunut kurssin aikana. Kvanttimekaniikan perusteet vaikuttivat selkeämmiltä kuin ennen kurssia.

- Kyllä se ehkä jonkun verran on muuttunu, et kuitenki nyt (...) nää ilmiöt, jotka johti kvanttimekaniikkaan (...) esimerkiks tää (...) lämpökapasiteettiasia oli semmonen että (...) siihen aikaan kun oon opiskellu, ni sitä ei millään tavalla es painotettu, en es muistanu että semmonen asia on olemassa (...) ja muutenki ni tään kurssin aikana on (-) pohdiskeltu sillä tavalla monia asioita, että nää on myös ymmärtäny. (...) kvanttimekaniikan (-) perusteet, nii kyllä ne jollakin tavalla on niinku selkeempänä (-) ymmärtää, ehkä paremmin kun ennen tätä kurssia.

Tuomas piti kurssia yleisesti ja sen osa-alueita melko vaativina. Hänen näkemyksensä kurssin tasosta on hieman yllättävä, koska esi- ja lopputestissä hän oli kurssilla parhaiten menestyneitä opiskelijoita. Paneutuminen kurssiin ja kiinnostus kurssilla käsiteltäviin aiheisiin näkyi huolellisesti vastatuista kotitehtävistä ja tuli ilmi myös haastatteluissa. Tehtävien tasoa Tuomas kommentoi vaihtelevaksi: ”osa oli helpohkoja mutta suurin osa oli vaativia”. Tuomas seurasi kurssia aktiivisesti ja pyrki omaksumaan asiat sitä mukaa kun ne tulivat kurssilla esille siinä myös hyvin onnistuen.

#### B. Opetusmenetelmät

Tuomas suhtautui kurssin opetusmenetelmiin myönteisesti. Taustatehtävät ja kotitehtävät hän arvioi oman oppimisensa kannalta hyviksi sekä luentotehtävät ja luennot melko hyviksi menetelmiksi. Tuomas koki oppineensa paljon tehtäviä pohtiessaan. Erityisesti häntä harmitti WebCT:n keskustelufoorumin vähäinen käyttö. Hänestä opiskeltavista asioista keskustelu lähiopetusjaksojen välillä olisi ollut hyödyllistä.

## C. Oma työpanos

Oman työpanoksensa arvioinnissa tuntiaktiivisuuden ja tenttiin valmistautumisen kohdalla Tuomas on melko itsekriittinen ja arvioi suoriutumisensa vain melko hyväksi. Ehkä hän koki, että olisi voinut panostaa kurssiin vieläkin enemmän. Opettajan näkökulmasta Tuomaan kurssipanosa on esimerkillinen. Tämä osallistui lähiopetukseen aktiivisesti ja toi omia näkemyksiään esille. Aktiivisuus toki voidaan ymmärtää monin eri tavoin. Hiljaa itsekseen opetuksessa käsiteltäviä asioita mietiskelevä henkilö voi olla aktiivisempi kuin näennäisesti osallistuva henkilö, joka miettii samalla opetuksen kannalta epärelevanttejä asioita.

Lähiopetukseen osallistumisessa ja tausta- ja kotitehtävien tekemisessä Tuomas suoriutui mielestään hyvin. Tämä pitää paikkaansa myös opettajan näkökulmasta tarkasteltuna. Tuomas osallistui yhtä lukuun ottamatta kaikkiin lähiopetusjaksoihin sekä teki ja palautti itsenäisesti ratkaistavat tehtävät huolellisesti tehtyinä ja ajoissa.

## 5.3 Tapausopiskelija Aapo

Aapo oli opintojensa loppuvaiheessa oleva fysiikan opettajaopiskelija. Aapon menestyminen esitestissä oli opettajaopiskelijoiden parhaimmista.

### 5.3.1 Esitesti ja ensimmäinen haastattelu

Esitestin ja ensimmäisen haastattelun tuloksia käsitellään yhdessä, koska haastattelu toteutettiin noin viikon kuluttua esitestistä, eikä haastateltavan käsitysten katsota muuttuneen näiden kahden tapahtuman välisenä aikana merkittävästi. Haastattelussa sovelletaan paikoin STR-menetelmää. Esitestissä ja haastattelussa läpikäytyt aiheet löytyvät taulukossa 5.13 (s. 130)

**Taulukko 5.13.** Aiheet esitestissä ja ensimmäisessä haastattelussa. x = aihe esiintyi testissä tai haastattelussa.

AIHE	Esitesti	Haastattelu 1
Absorptio	x	x
Emissio	x	x
Sironta	x	x
Sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismi		x
Kvantittuminen	x	x
Hiukkanen kvanttifysiikassa ja klassisessa fysiikassa	x	
Fotoni	x	x
Elektroni	x	x
Comptonin ilmiö		x
Valosähköinen ilmiö	x	x
Mustan kappaleen säteily	x	x

#### A. Absorptio, emissio ja sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismi

Esitestissä Aapo määritteli absorption ja emission seuraavasti:

Absorptio. ”Kun kappale ”imee” sisäänsä (vrt. adsorptiossa pinnalle) säteilyenergiaa. Esim. koivunlehti absorboi tiettyjä aallonpituuksia ja käyttää energian yhteyttämiseen tai jonkin kappaleen lämpötila kohoaa auringossa.”

Emissio. ”Absorptiosta voi seurata emissio, eli kappale lähettää energiaa säteilynä. Emittoitu aallonpituus ei yleensä sama kuin absorptiossa (eri energiat!).”

Haastattelussa Aapolle palautettiin mieleen hänen esitestin vastauksensa ja pyydettiin selittämään mitä absorptiossa tapahtuu atomitasolla.

- No edelleen jonkinlaisia viritystiloja (...) ainakii siinä ku se joku kappale lämpenee ni siinä tapahtuu justinsa virityksiä ja se (-) eiku ei siinä voi virityksiä (...) vaan se (...) niitten kappaleitten nopeus ikäänkun kasvaa, tai se värähtely (-) nopeus, ne sitoo itteensä sitä säteilyn energiaa jota se absorboi (...) sitte jos ajattelee sitä fotosynteesiä mitä oon käyttäny esimerkkinä nii siinäki niitten hiukkasten liike-energia kasvaa nii sit se reaktio on mahdollinen, sitoutuu se energia sitten siihen (...) kun kappale lämpenee niin jossain vaiheessa se saavuttaa jonki tasapainon että se rupee sit emittoimaa myös sitä (-) tai se koko ajanhan se emittoi, mutta jossain vaiheessa sitte tulee tasapaino ja se ei enää lämpene.

Aapo lisäsi, että kaikki kappaleet emittoivat sähkömagneettista säteilyä eli energiaa lämpötilan ollessa yli 0 kelviniä. Sähkömagneettinen säteily Aapo ymmärsi sähkömagneettiseksi aaltoliikkeeksi, jota syntyy atomin sisäisten viritystilojen purkautumisena.

Tulkinta. Aapon absorption ja emission määritelmät perustuivat klassisiin malleihin, joissa energiaa absorboituu tai emittoituu jatkuvana prosessina. Kvanttimalleja hän ei haastattelussa tuonut esille. Säteilyn aallonpituuden muuttuminen emissiossa on virheellinen ajattelutapa ja liittyy ilmeisesti mielikuvaan sironnasta.

Aapo vaikutti ymmärtävän, että absorptiossa säteilyn energia muuntuu kappaleen rakenneosien liike-energiaksi eli energia säilyy: hänen selityksensä taustalla oli klassinen aineen rakenneosamalli. Hän esitti epäsuorasti myös lämpötasapainon käsitteen.

Sähkömagneettisen säteilyn Aapo ymmärsi sähkömagneettiseksi aaltoliikkeeksi, jota syntyy atomin viritystilojen purkautuessa. Hän ei kuitenkaan tarkemmin tuonut esille, mitä hän käsittää atomin viritystiloilla, kuten ei myöskään klassista sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismia.

Tieteellisen näkemyksen mukaan näkyvä valo ja ultraviolettialueen säteily syntyy atomin valenssielektronien viritystilojen purkautuessa, röntgensäteily atomin sisäelektronien viritystilojen purkautuessa ja gammasäteily ytimen viritystilojen purkautuessa. Vastaavasti infrapuna- ja mikroaaltosäteilyn syntymistä selitetään molekyylien sidosten värähtelyllä ja radiosäteilyn syntymistä molekyylien pyörimisellä. (Lévy-Leblond & Balibar 1990).

Aapo käytti sähkömagneettisen säteilyn ja (säteily)energian käsitteitä samamerkityksisinä. Tämä voi johtua käsitteiden eriytymättömyydestä tai ongelmista ymmärtää sähkömagneettisen säteilyn synnyn klassinen ja kvanttimalli sovellusalueineen.

## B. Sironna ja Comptonin ilmiö

Esitestissä Aapon mieltä sironnailmiön johtuvan ilman taitekertoimen aallonpituusriippuvuudesta.

Sironna. ”Valon jakautuminen eri aallonpituuksiin. Johtuu siitä, että taitekerroin on (yleensä) erilainen eri aallonpituuksille.”

Haastattelussa Aapo selitti sironnan käsitettä käyttäen esimerkkinä valon sironnasta. Hänen mukaansa ilta-aurinko punainen väri johtuu siitä, että tällöin valo kulkee pitemmän matkan ja sininen valo siroaa happimolekyyleistä, jolloin nähdään punaista

valoa. Aapo esitti, että ilmiö liittyy siihen, että ilman taitekerroin riippuu aallonpituudesta.

- Se justiinsa tämä valon sironta, kun taivas on sininen (...) ja tuota ilta-auringossa sitte kun kulkee pitemmän matkan se valo, nii se siroaa enemmän niistä, oliko se just happimolekyyleistä, joistaki molekyyleistä kumminkii, että se sininen valo siroaa sitte jo pois ja punainen vaa pääsee tänne näkyvii (...) ilmeisesti se sitten (-) liittyy siihen erilainen taitekerroin eli eri aallonpituuksilla (-) esimerkiks nyt tällä ilmalla jos ajatellaan sitä kokonaisuutena.

Aapo toi esille, ettei tarkemmin tunne Comptonin ilmiötä, vaikka se onkin hänelle nimenä tutun kuuloinen.

Tulkinta. Esitestin vastauksen perusteella Aapo vaikutti sekoittavan toisiinsa dispersion<sup>46</sup> ja sironnan<sup>47</sup> käsitteet. Se, ettei hän osannut selittää sirontailmiötä hyväksyttävästi haastattelussa ei siis ole yllättävää. Comptonin sironta oli Aapolle vieras.

### C. Valosähköinen ilmiö

Valosähköisen ilmiöön liittyviä ennakkotietoja kartoitettiin tehtävällä, jossa on esitetty ilmiön tutkimiseen käytettävän koelaitteiston kytkentäkaavio. Tehtävässä pyydettiin nimeämään ja selittämään ilmiö sekä kuvailemaan laitteiston toimintaperiaatetta.

”Comptonin ilmiöön. UV-valo irrottaa elektroneja ja irtoaako vai ei riippuu aallonpituudesta, jos irtoaa niin intensiteetti lisää irtoamisnopeutta.”

”Säädettävän jännitelähteen avulla saadaan määritettyä elektronien liike-energia ( $\frac{1}{2}mv^2 = eU$ ) => tulevan säteilyn energia / aallonpituus / Planckin vakio.”

Haastattelussa Aapo kertoi, että kaaviossa esiintyvä nuoli kuvaa energiaa, esimerkiksi fotonia. Hän viittasi cum laude -laboratoriotöistä jääneeseen mielikuvaan.

- Tää on sitte tietysti, kuvaa sitä energiaa, fotonia tai jotain.

- *Mistä sie tiität että se kuvaa fotonia tai energiaa?*

- No oletetaan, että tää on vastaava mikä se cumun työ on (-) fysiikassa että tää liittyy siihen.

- *No sitte kun tuola on tommonen nuoli nii mitäköhän se niinku halua sanoo?*

---

<sup>46</sup> Dispersio tarkoittaa väliaineen taitekertoimen aallonpituusriippuvuutta.

<sup>47</sup> Sironnassa säteilyn etenemissuunta muuttuu aallonpituuden pysyessä vakiona.



- No siitä sitten irtoaa siitä pinnalta elektroneja.

Aapo oli edelleen sitä mieltä, että koelaitteisto liittyy Comptonin ilmiöön, mutta epäili, ettei ilmiön edellytyksenä ole UV-valo.

- Joo, se on varmaaki ihan muistikuva vaan siitä työstä tuo uv-valo, että (-) käytetään uv-valon aallonpituuksia siinä, että (-) ei ne varmaan muulla tavalla (-) että tuossa Comptonin ilmiössä ei välttämättä varmaan tarte olla uv-valoo, että se johtuu siitä työstä tuo uv-valo mikä on miun muistikuva.

Tulkinta. Aapo hallitsi melko hyvin valosähköisen ilmiön, vaikka nimesi sen esitestissä virheellisesti Comptonin ilmiöksi. Hän kertoi, että valosähköisessä ilmiössä säteily aikaansaa elektronien irtoamisen ja ilmiön avulla voidaan määrittää Planckin vakion arvo. Hän myös ymmärsi, että elektronien irtoaminen riippuu säteilyn aallonpituudesta.

Haastattelussa ei käynyt ilmi, mitä Aapo ymmärsi elektronien irtoamisnopeudella. Valosähköisessä ilmiössä irtoavien elektronien määrä eli elektronivirta on verrannollinen säteilyn intensiteettiin rajataajuuden ylittyessä. Elektronien saamiin nopeuksiin sen sijaan intensiteetti ei vaikuta, vaan elektronien nopeus vaihtelee suuresti. Klassinen teoria ennusti, että elektronien nopeudet ovat hyvin pieniä, koska ne irtoavat heti kerättyään riittävän määrän energiaa, eikä energia juuri jää liike-energiaksi.

Aapon tuo haastattelussa esille, että hänen tietämyksensä valosähköisestä ilmiöstä nojaa cum laude -laboratoriotöihin. Fotonin ja jatkuvan energian (= energiaa) käsitteiden käyttö samamerkityksisinä viittaa käsitteiden eriytymättömyyteen tai huolimattomaan kielenkäyttöön.

#### D. Mustan kappaleen säteily

Esitestissä mustan kappaleen säteilyn tuntemusta kartoitettiin tehtävällä, jossa oli esitetty mustan kappaleen säteilyspektri siihen liittyvine lakeineen. Tehtävässä pyydettiin selittämään spektriin liittyvät havainnot.

*”Mihin havaintoihin kuvion 1 esittämät kuvaajat mielestäsi liittyvät?”*

”Mustan kappaleen säteilyyn?”

Haastattelussa Aapo kertoi esitestissä vain arvanneensa ja perusteli vastaustaan sillä, että kuvaajassa ilmenevä aallonpituus-lämpötila -riippuvuus on ominaista mustan kappaleen säteilylle ja yleensäkin kappaleen säteilylle. Hän selitti, että alkuaineet emittoivat kullekin ominaista aallonpituutta, jonka perusteella ne voidaan tunnistaa.

Aapo ei osannut selittää mustan kappaleen säteilyn havaintoja esittävän kuvaajan käyttäytymistä.

Tulkinta. Esitestin tehtävän liittäminen mustan kappaleen säteilyyn on vain onnekas arvaus; Aapo ei osanut selittää säteilykuvaajan käyttäytymistä. Lisäksi hän tulkitsi mustan kappaleen säteilyn mitattujen arvojen esittävän alkuaineiden ominaissäteilyä.

#### E. Klassinen ja kvanttifysikaalinen hiukkanen

Näkemyistä klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan olioiden eroista pyrittiin selvittämään esitestin tehtävällä, jossa tuli kuvailla klassista hiukkasta ja kertoa miten kvanttifysikaalinen hiukkanen poikkeaa siitä.

”Hiukkasen paikka ja nopeus tunnetaan tai voidaan aina laskea klassisessa fysiikassa. Kvanttifysikaalisen hiukkasen paikasta voidaan vain sanoa jokin todennäköisyys, että se on tietyllä hetkellä jossakin paikassa (tai alueella). Myöskään kvant. fys. hiukkasen nopeutta ei tunneta tarkasti (Heisenbergin epätarkkuus pa.).”

Tulkinta. Aapon vastaus klassisen ja kvanttifysikaalisen hiukkasen eroihin vaikutti opetuksessa käytetyn mallivastauksen toistamiselta. Hän ei lainkaan kuvaillut klassista hiukkasta ja sen ominaisuuksia, eikä maininnut esimerkkejä kumpaankaan kategoriaan kuuluvista olioista.

#### F. Elektroni

Elektroni. ”Alkeishiukkanen, jolla on negatiivinen varaus ja sillä on myös lepomassa.”

Kysyttäessä mitä ominaisuuksia elektronilla on Aapo mainitsi lepomassan ja alkeisvarauksen suuruuden negatiivisen varauksen kuten esitestissäkin. Häntä pyydettiin luokittelemaan elektroni klassisen fysiikan hiukkasiin tai kvanttifysiikan olioihin.

- Ehkä se on kvanttifysikaalinen olio, mut sitä kumminkii klassisestikin voidaan käsitellä sähkökentissä esimerkiks.

- *Mikä tekee elektronista kvanttifysikaalisen olion?*

- No varmaan se koko (-) ei se nyt pelkästään se koko tee mutta (...)

Kysyttäessä onko elektronilla sellaisia ominaisuuksia, joita ei voida selittää klassisen fysiikan teorioiden avulla, Aapo viittasi varauksen kvantittumiseen.

- No se joo, siis se kvantittuminen, se varauksen kvantittuminen, mutta sehän nyt tavallaan se elektroni, että siihenhän sitä tarvitaan.

- *Siis varauksen kvantittuminen?*

- Siis se (...) varaus on kvantittunut ja elektroni on se alkeisyksikkö eli se pienin varaussyksikkö mikä tunnetaan.

Tulkinta. Aapo määritteli elektronin alkeishiukkaseksi, jolla on negatiivinen varaus ja lepomassa. Hän koki elektronin kvanttifysikaaliseksi olioksi, jota voidaan käsitellä klassisesti esimerkiksi sähkökentissä. Elektronin kvanttiolioisuutta tämä pyrki selittämään elektronin pienellä koolla ja alkeisvarauksen kvantittuneisuudella, joka luo tarpeen elektronin olemassaololle.

Aapon esittämä elektronin määritelmä vaikutti opetuksessa kuullun tiedon toistamiselta, koska hän ei osannut perustella näkemystään. Elektronin pieni koko on vain osa elektronin kvanttiolioisuutta. Kvanttikenttäteoriassa elektroni oletetaan pistemäiseksi, eikä tiede ole vielä onnistunut määrittämään elektronin dimensiota. Yksittäistä elektronia ei voida käsitellä klassisesti sähkökentissä kuten Aapo esittää, mutta elektronisuihkua voidaan.

## H. Fotoni

Fotoni. ”Hiukkanen, jolla ei ole lepomassaa, mutta sillä on kuitenkin liikemäärä. Valon dualistisen luonteen (aalto-hiukkas) vuoksi tarvitaan tällainen hiukkanen.”

Haastattelussa Aapo mainitsi fotonin liikemäärän ja lepomassattomuuden kuten esitestissäkin nimittäen lisäksi fotonia sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkaseksi. Fotonin eroavuutta klassisista hiukkasista hän perusteli klassisten hiukkasten lepomassallisuudella. Hetken pohdittuaan hän lisäsi, että fotonin eteneminen valon nopeudella erottaa sen klassisista hiukkasista.

Kysyttäessä mitä Aapon esitestissä mainitsema käsite dualistinen tarkoittaa, tämä viittasi valon aalto- ja hiukkasluonteeseen.

- *Sie olit laittanu tänne [esiteistiin], että valon dualistisen luonteen vuoksi tarvitaan tällanen hiukkanen. Mitä tuo dualistinen siun mielestä tarkoittaa?*

- Sillä [valolla] on se aalto- ja hiukkasluonne.

- *Mitä se aaltoluonne tarkoittaa?*

- No sillä (valolla) on sähkömagneettisen aaltoliikkeen ominaisuuksia eli silloin ne, vissiin (...) sähkö- ja magneettikentät, ja taidetaan ainakii sit sen avulla sitte selittää just näitä heijastumisia ja taittumisja ja näitä.

Aapon mukaan aalto- ja hiukkasluonne tarvitaan, koska kaikkia ilmiöitä ei voida selittää joko aaltoluonteen tai hiukkasluonteen avulla. Hän ei kuitenkaan pystynyt kertomaan mihin valon hiukkasluonnetta tarvitaan.

Tulkinta. Aapo mielsi fotonin hiukkaseksi, joka tarvitaan valon dualistisen eli aalto- ja hiukkasluonteen vuoksi. Aalto- ja hiukkasluonteen merkitystä hän ei kuitenkaan osannut kovin hyvin selittää. Aaltoluonteen hän kertoi tarkoittavan, että valolla on sähkö- ja magneettikentät, eikä hän kyennyt selittämään hiukkasluonteen merkitystä. Valolla toki on sähkö- ja magneettikentät, mutta aaltoluonteella tarkoitetaan kaikille klassisille aaltoliikkeille tyypillisiä ominaisuuksia.

Ymmärtämisen ongelmat dualismiin ja erityisesti hiukkasluonteeseen liittyen ovat linjassa sen kanssa, ettei Aapo hallinnut sirontailmiötä eikä viittannut absorption ja emission yhteydessä kvanttimalleihin.

Aapo sanoi fotonia sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkaseksi, joka oletettavasti on opetuksessa kuullun tai luetun toistamista ilman ymmärtämistä, koska mikään haastattelussa ei tukenut käsitystä siitä, että hän ymmärtäisi määritelmän merkityksen. Tieteen määritelmän mukaan foton on sähkömagneettisen *vuorovaikutuksen* välittäjähiukkanen, ei sähkömagneettisen säteilyn.

Aapon perusteli fotonin kvanttiluonnetta lepomassattomuudella ja valon nopeudella. Fysiikan näkökulmasta foton on massaton olio. Valon nopeus on itse asiassa sähkömagneettisen säteilyn ominaisuus, ei aidosti fotonin.

## F. Kvantittuminen

Kvantittuminen. Energia ei ole jatkuva suure, vaan sen arvot voivat vaihdella ”hyppäyksittäin”.

Haastattelussa Aapo liitti kvantittumisen energiaan ja varaukseen.

- Siis tietyn suurina annoksina eli se ei oo jatkuva (...) se energian kvantittuminen tai se varaus, eli siinä on varauksessa se elektronin alkeisvaraus on se pienin yksikkö ja energiassa on sitten myös se, et se ei jatkuvana etene vaan portaittain.

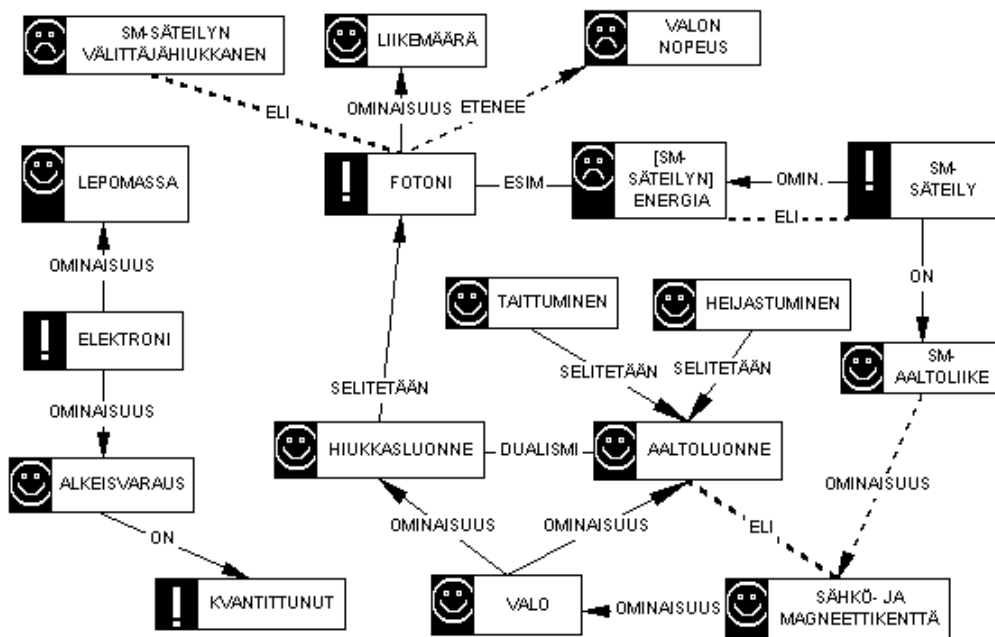
Tulkinta. Esitestissä Aapo liitti kvantittumisen vain energiaan, jonka ymmärsi epäjatkuva suureksi. Ilman esimerkkejä tai kontekstia hänen vastaustaan on vaikea ymmärtää. Klassisesti energia on aina jatkuva suure.

Haastattelussa Aapo sanoi kvantittumisen tarkoittavan, että varaus koostuu alkeisvarauksen monikerroista, tai energia etenee portaittain. Energialla hän ilmeisesti tarkoitti sähkömagneettisen säteilyn energiaa. Tämä vaikutti ajattelevan sähkömagneettisen säteilyn energian etenevän kvantittuneena eli viittasi säteilyn

rakenneosamalliin eikä näyttänyt ymmärtävän kvanttumisen liittymistä sähkömagneettisen säteilyn ja aineen väliseen vuorovaikutukseen.

### G. Aapon käsiteverkko kurssin alussa

Aapon elektronin ja fotonin ontologiaan liittyvien esitestin ja ensimmäisen haastattelun vastauksista muodostettua käsiteverkkoa esittää kuvio 5.5. Elektronin kvanttunutta alkeisvarausta sekä fotonin nopeutta ja massattomuutta lukuun ottamatta elektronin ja fotonin ominaisuudet ovat klassisen hiukkasmallin ominaisuuksia. Kuten kuviosta havaitaan, hiukkasluonteen ja aaltoluonteen käsitteet eivät yhdisty fotoniiin tai elektroniin, vaan valoon. Lisäksi aaltoluonteen käsite saa tieteellisestä käsityksestä poikkeavan merkityksen. Fotoni toimii Aapon mukaan valon hiukkasluonteen selittäjänä.



**Kuvio 5.5.** Aapon esitestin ja ensimmäisen haastattelun vastausten perusteella muodostettu käsiteverkko. Aloituskäsitteet on merkitty huutomerkillä, tieteellisen käsityksen mukaiset käsitykset positiivisella hymiöllä ja sen vastaiset negatiivisella hymiöllä. Mikäli käsite liittyy hyväksyttävällä tavalla vain toiseen kvanttiolioon, on kuviossa käytetty symbolitonta laatikkoa. Lisäksi tieteellisen käsityksen vastaiset kytkeytymiset on osoitettu katkoviivalla.

### 5.3.2 Toinen haastattelu

Toisessa haastattelussa käsiteltiin fotonin ja elektronin ominaisuuksia niitä tarkastelevan tehtävän pohjalta. Haastateltava valitsi tehtävässä listatuista ominaisuuksista ja suureista ne, jotka hänen mielestään liittyvät olioihin perustellen valintansa. Lisäksi haastattelussa keskusteltiin Comptonin sirontakokeen koejärjestelyä ja tuloksia esittävien kuvaajien pohjalta ennen Comptonin ilmiön varsinaista käsittelyä kurssilla. Aapon käsitystä dualismista pyrittiin myös selvittämään ensimmäistä haastattelua perusteellisemmin.

#### A. Comptonin ilmiö

Aapo kertoi, että tunne hänelle esitettävää Comptonin koejärjestelyä. Ensin hän kertoi, ettei osaa tulkita tapahtumaa, mutta esitti kuitenkin arvauksen, että kyseessä on röntgensäteilyn sironta hiilestä. Aapo pyrki myös selittämään mistä sironta johtuu:

- Kai se vois johtuu siitä vaa, että se ikään kun absorboituu sinne se energiakvantti mitä tuossa nyt kuljettaa, ja sitte se (...) emittoituu satunnaiseen suuntaan että (-) ihan vaan semmonen selitys.

Comptonin sirontaspektreissä alkuperäisen, tulevan säteilyn aallonpituuden lisäksi esiintyvän toisen aallonpituuden Aapo yritti selittää atomin kuorimallin avulla.

- Nii, minkäslainen se hiili kai se oli (-) jos ajattelee ihan kuorimallia (-) kai se on tuommonen, kaks sisimmällä kuorella, ja neljä sitte sillä toisella kuorella (-) voisko se olla, että tää toinen tulis siitä, että kakkoskuoren elektroni virittys tuone, menis seuraavale kuorelle ja (-) ehkä se ois järkevämpi, että se menee jopa sitä (...) seuraavale kuorelle (-) elikkä tuo, nuo pysys tuola kumminki kun se on täys kuori. Elikkä et se vois hypätä kahelle eri (...) energiatasolle ja sitte se () ku se tapahtus se emissio, nii sit tulis kaks eri aallonpituutta. Mutta en mä tiiä sitte, että minkä takii nollakulmaan tulee vaan yks ja (-) että ei tuo minun selitys sitä ihan (-) kerro kyllä (-) tai (...) onhan tässä näköjään näitä kaikilla muillakin aallonpituuksilla niitä (-) havaintoarvoja.

Tulkinta. Aapo sanoi ettei tunne Comptonin ilmiötä, sen koejärjestelyä tai tuloksia, mutta luultavammin tämä ei vain muista ilmiötä. Comptonin ilmiö kuuluu Aapon jo suorittaman fysiikan aineopintoihin kuuluvan kvantti- ja atomifysiikan kurssin sisältöön.

Aapo päätteli oikein, että kyseessä on sirontailmiö. Myös hänen päättelynsä itse sirontatapahtumasta (energiakvantin absorptio ja emissio hiileen) osui melko lähelle Comptonin ilmiölle käytettyä selitysmallia, jossa tuleva fotoni absorboituu hiileen ja sironnut fotoni emittoituu. Tässä selitysmallissa kolmas osapuoli on kuitenkin elektroni, joka saa osan tulevan fotonin energiasta. Comptonin tulosten selittämistä Aapo yritti atomin viritystilan muutosten avulla, mutta ongelmana näytti olevan ettei hän

huomannut tulevan aallonpituuden esiintymistä sirontaspektreissä. Aapon ilmaisema käsitys säteilyn toimimisesta kvantittuneen energian kuljettajana ilmeni jälleen.

## B. Dualismi

Dualismin eli aalto- ja hiukkasluonteen Aapo ymmärsi siten, että esimerkiksi valon tiettyjä ominaisuuksia selitetään valon hiukkasluonteen eli fotonin avulla ja tiettyjä aaltoluonteen avulla. Hänen mukaansa esimerkiksi valon taittumisen selittämiseen käytetään valon aaltoluonnetta. Aapolta kysyttiin, voidaanko valon taittuminen selittää hiukkasluonteen avulla.

- Kai se ois aika hankalaa, jos aattelis että rinnastaa esimerkiks elektroniin sen fotonin (-) tuskin se sillä tavalla säännöllisesti taipuu (...) mutta mihin me sitten tarvitaan sitä hiukkasluonnetta? (...) Nähtävästi just tarvitaan näihin tilanteisiin sitä hiukkasluonnetta, että ne selitetään ne virittymiset, absorptiot ja virittymiset sen avulla.

Tulkinta. Aapo kuvaili dualismia samaan tapaan kuin ensimmäisessä haastattelussa. Tässä haastattelussa hän mainitsi virittymisen ja absorption esimerkkeinä ilmiöistä, joiden selittämiseen tarvitaan valon hiukkasluonnetta eli fonia. Hän vaikutti löytävän oikean suuntaisen merkityksen valon hiukkasluonteelle.

Verratessaan fotonin taipumista elektronin taipumiseen Aapo totesi, että fotonin taipuminen on epäsäännöllisempää kuin elektronin. Tämä viittaisi siihen, että hän ajatteli elektronilla ja fotonilla olevan radat, mikä ei ole tieteellisen käsityksen mukaista.

## C. Elektroni

Aapo kertoi elektronin ominaisuudeksi massan, jonka suuruus on  $6,1 \cdot 10^{-31}$  kg. Hän lisäsi, että elektronin sijaitessa sähkökentässä sillä on potentiaalienergiaa, jonka suuruus on elektronin varauksen ja jännitteen, tai jännite-eron referenssisitasoon verrattuna, tulo. Aapon mukaan elektronilla on myös liikkeessaan liike-energiaa, jonka suuruus on  $\frac{1}{2}mv^2$ , missä m on elektronin massa ja v sen nopeus. Hänen mukaansa elektronin massan ja nopeuden tähden sillä myös ominaisuus liikemäärä, joka on edellä mainittujen tulo.

Aapo liitti myös sähkömagneettisen säteilyn elektroniin ja perusteli valintaansa seuraavasti:

- No sähkövirta on elektronien liikettä ja (...) sähkövirtahan synnyttää sitte magneettikentän (...) sähkömagneettinen kenttä siinä on aikakii (...) no sitä kautta mie sen liitin tuohon.

Elektronin nopeuden suuruudesta hän arveli, että elektroni voi ainakin teoreettisesti saavuttaa valon nopeuden kiihdytettäessä sitä riittävästi. Hänen mukaansa elektronilla on alkeisvarauksen suuruinen negatiivinen varaus. Hän liitti myös paikan käsitteen elektroniin.

- *Sitten mitä tuosta elektronin paikasta sanosit?*

- No se paikka voidaan tuntea tarkasti. Mä aattelin että fotonia ei voi laittaa mihinkää laatikkoon varmaankaan.

- *Jos ajatellaan vaikka sitä Bohrin atomimallia, siellä kun on niitä elektroneja siellä ytimen ympärillä, nii tiedetäänkö siinä tarkasti missä se elektroni on?*

- Ei, ei tietä, ei tietä.

- *No mitäs siitä silloin voidaan sanoa siitä elektronin paikasta? Voidaanko siitä sanoa...*

- Voidaan, tietään, että se on tietyllä todennäköisyydellä jollaki alueella.

Aapon mielestä elektronilla on myös fyysinen koko, olipa se sitten paikallaan tai liikkeessä. Lisäksi koko voidaan periaatteessa mitata, koska elektronilla on massakin.

Tulkinta. Aapon liitti elektroniin useita klassisen hiukkasmallin ominaisuuksia, kuten liike- ja potentiaalienergian käsitteet ja liikemäärän. Hänen mukaansa elektronin fyysinen koko voidaan mitata sen massan tähden. Massan suuruuden hän muisti hieman väärin,<sup>48</sup> mutta sen suuruusluokka on oikea. Aapon elektronin voi laittaa laatikkoon eli sillä on tarkka paikka. Atomissa sijaitsevan elektronin paikan tämä sen sijaan ajatteli voitavan tietää jollakin todennäköisyydellä. Tieteellisen käsityksen mukaan olion tarkalla paikalla tarkoitetaan, että sen paikka voidaan tietää kaikilla ajan hetkillä täsmällisesti eli oliolla on ennustettavissa oleva rata, mitä elektronilla ei voida ajatella olevan. Aapon ilmaisema atomin elektronin paikan todennäköisyystulkinta on hyväksyttävä, vaikkakin tiedollisesti vaatimaton.

Vaikuttaa siltä, että Aapon elektronimalli on synteettinen: toisaalta elektroni on klassinen kappalemäinen olio, toisaalta taas se on ei-klassinen olio, jolla on ei-klassisia ominaisuuksia. Kontekstista riippuen valitaan sopiva malli.

#### D. Fotoni

Aapon mukaan fotonilla on massa, ja sen vuoksi liikemäärä, mutta lepomassaa sillä ei ole. Hän lisäsi, että fotoni kuljettaa valokvanttia, energiaa tai valoa eli on valon

---

<sup>48</sup> Oikea arvo on  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg.



välittäjähiukkanen. Hän myös kertoi fotonin etenevän valon nopeudella tai väliaineen vaikutuksesta sitä hitaammin. Hiukkasluonteen liittymisestä fotoniin Aapo totesi seuraavasti.

- No se fotoni on just se, käytetään selittämiseen, sen valon kulun selittämiseen elikkä (-) se on just, se fotoni on just se hiukkanen jota (-) siinä tarkotetaan.

Aapo totesi, että fotonia ei voida laittaa laatikkoon kuten elektronia. Häneltä kysyttiin, voitaisiinko fotonin paikka ilmaista esimerkiksi tietyllä todennäköisyydellä.

- *Fotoniin paikka ei siusta liity mitenkään? Voitaisko sitä todennäköisyyttä käyttää myös fotonin tapauksessa?*

- Ei ainakaa samalla tavalla, koska ei sillä oo ees mitään semmosia ratoja minkään ympärillä (...) kyllähän me voidaan sanoo, että jollai todennäköisyydellä tässä huoneessa on näitä fotoneja varmasti kun täällä nähdään.

Aallonpituus, taajuus ja amplitudi eivät Aapon mielestä ole fotonin ominaisuuksia, koska ne liittyvät valon aaltoluonteeseen ja fotoni liittyy valon hiukkasluonteeseen.

Tulkinta. Aapon fotonikäsite oli perustaltaan samankaltainen kuin ensimmäisessä haastattelussa, mutta syvemmälle luotaava haastattelu osoitti hänen fotonikäsitteensä sekavammaksi ja virheellisemmäksi ensimmäiseen haastatteluun verrattuna.

Aapo perusteli fotonin liikemäärää sen massallisuudella, mutta totesi, ettei fotonilla ole lepomassaa. Ilmeisesti hän ajatteli, että fotonin liikemäärä saadaan klassisen liikemäärän yhtälön avulla korvaamalla nopeus valon nopeudella. Tieteellisen käsityksen mukaan fotonin liikemäärä riippuu säteilyn aallonpituudesta ja Planckin vakioista.

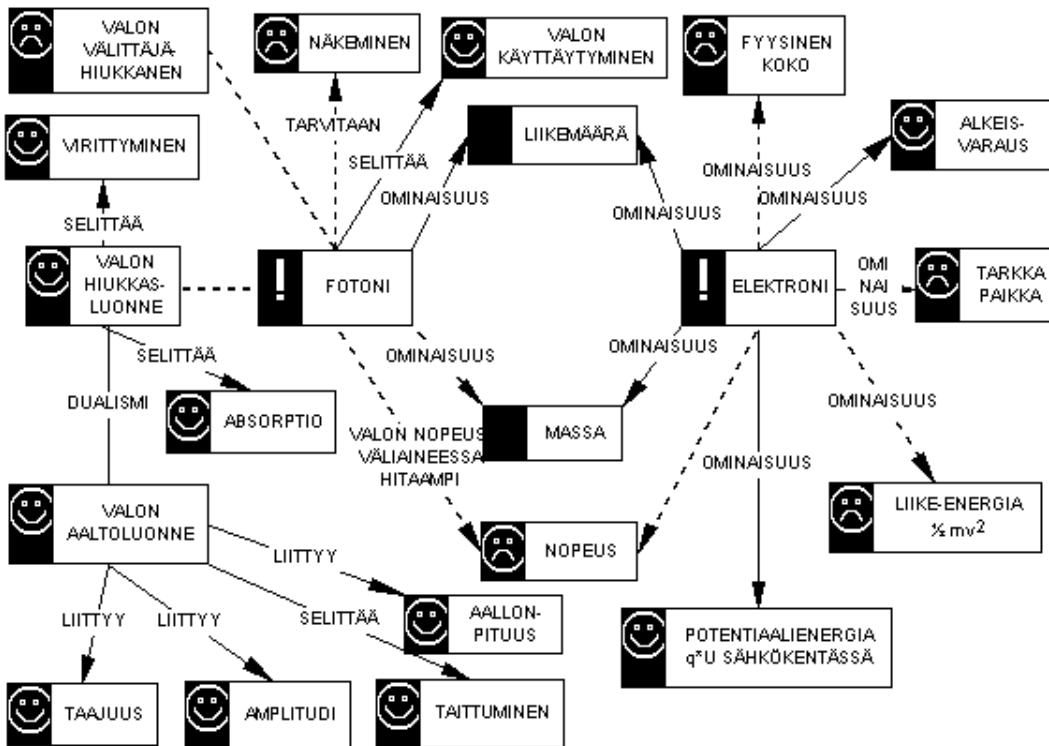
Tässä haastattelussa Aapo sanoi fotonin toimivan valokvantin, energian tai valon *kuljettajana* eli toimivan valon välittäjähiukkasena. Hänen fotonikäsitteensä oli monella tapaa virheellinen. Tieteellisen käsityksen mukaan fotonit ilmenevät säteilykentän ja materian välisissä vuorovaikutustapahtumissa, joissa ne välittävät energiaa, liikemäärää ja pyörimismäärää kvantteina. Fotonit eivät siis kuljeta säteilyä, valoa tai energiaa. Valokvantti on fotonin historiallinen edeltäjä, fotoni ei siten voi kuljettaa valokvanttia. Fotonin käsite tarvitaan säteilykentän ja materian välisen vuorovaikutuksen tulkintaan, eikä sen avulla selitetä valon etenemistä.

Aapo vaikutti ajattelevan, että fotoneja tarvitaan näkemiseen. Tätä käsitystä olisi pitänyt selvittää tarkemmin haastattelussa, jotta sen oikeellisuudesta voi tehdä päätelmiä. Valon aaltoluonteesta tämä ilmaisi oikeamman käsityksen kuin ensimmäisessä haastattelussa viittaamalla aalto-ominaisuuksiin (esim. taajuus ja

aallonpituus) sähkö- ja magneettikenttien sijaan. Hän ymmärsi dualismin liittyvän valoon, muttei fotoniiin. Aapon käsitys fotonista oli vahvasti hiukkasmainen.

### E. Aapon käsiteverkko toisessa haastattelussa

Aapon elektronin ja fotonin ontologiaan liittyvistä toisen haastattelun vastauksista muodostettua käsiteverkkoa esittää kuvio 5.6. Kuten kuvioista nähdään, fotonin ja elektronin verkostot kytkeytyvät toisiinsa vain massan ja liikemäärän kautta, jotka hän ymmärtää klassisiksi ominaisuuksiksi. Lisäksi Aapon mukaan elektronilla on tarkka paikka mutta fotonilla ei ole. Hän liittää edelleenkin dualisuuden käsitteen ainoastaan valoon.



**Kuvio 5.6.** Aapon toisen haastattelun perusteella muodostettu käsiteverkko. Aloituskäsitteet on merkitty huutomerkillä, tieteellisen käsityksen mukaiset käsitykset positiivisella hymiöllä ja sen vastaiset negatiivisella hymiöllä. Mikäli käsite liittyy hyväksyttävällä tavalla vain toiseen kvanttiolioon, on kuviossa käytetty symbolitonta laatikkoa. Lisäksi tieteellisen käsityksen vastaiset kytkeytymiset on osoitettu katkoviivalla.

### 5.3.3 Kolmas haastattelu

Kolmannessa haastattelussa Aapo sai pohdittavaksi valosähköiseen ilmiöön ja mustan kappaleen säteilyyn liittyvät esitestin tehtävät. Tehtäviin vastaamisen jälkeen häntä pyydettiin selittämään, miten kvantittuminen ilmenee mainituissa ilmiöissä. Mainitut aihealueet oli jo käsitelty opetuksessa.

#### A. Mustan kappaleen säteily

Tehtävässä Aapo selitti mustan kappaleen säteilykuvaajan käyttäytymistä lyhyillä aallonpituuksilla kvantin energian kasvamisella.

*”Mistä johtuu, että [Planckin lain] kuvaaja lähestyy voimakkaasti nollaa maksimikohdan jälkeen aallonpituusalueella 500-1700nm?”*

”Johtuskohan siitä, että aallonpituuden pienentyessä kvantin energia kasvaa. Eli lyhyet aallonpituudet kuljettavat paljon energiaa ja niiden synnyttäminen myös vaatii paljon energiaa.”

Kurssin lopussa Aapo liitti mustan kappaleen säteilyyn kvantittumisen siten, että siitä lähtevä sähkömagneettinen säteily lähtee tietyn suuruisina annoksina, kvantteina. Hänen mukaansa lyhyillä aallonpituuksilla kvantin energia kasvaa, jolloin tarkasteltavassa lämpötilassa ei ole riittävästi energiaa suurienergiasten kvanttien emittoitumiseksi.

*- Miten se [kvantittuminen] tähän [tehtävään] liittyy?*

- No, sen mitä mä tässä nyt oon tavallaan liittäny, nii sillä tavalla mä tähän sen kvantittumisen vois liittää, että tuo säteily, joka valoon, tai ei tää nyt valoo, sähkömagneettinen säteily mikä tästä lähtee ni (...) se lähtee tietyn suuruisina annoksina, kvantteina (...) minkä takia tämä laskee jyrkästi, ni täällä sitten kasvaa se kvantin energia ni (-) niitä ei sitte siinä, jos tämä nyt kuvitellaan, että tämä niinku mä oon laittanu, että tämä ois jossain tietyssä lämpötilassa tämä käyrä (-) ni sitte siinä lämpötilassa ni (-) ei oo nii (-) paljon sitä energiaa, että niitä suurienergisiiä kvanteja lähtis (-) ni sitä kautta mä nyt tähän liittäisin sen.

Tulkinta. Aapon kirjallisen vastauksen perusteella hän käsitti sähkömagneettisen säteilyn energian etenevän kvantittuneena kuten aiemmissa haastatteluissa. Hän ymmärsi mustan kappaleen säteilyn syntyvän kvantteina, mutta hänen toteamuksensa lyhyiden aallonpituuksien ”synnyttäminen vaatii paljon energiaa” vaatisi tuekseen lisää perusteluja säteilyn syntymekanismiin liittyen.

Haastattelun perusteella Aapo ymmärsi, että sähkömagneettinen säteily emittoituu tietyn suuruisina annoksina eli kvantteina. Hän tulkitsi hyväksyttävästi mustan kappaleen säteilykuvaajan käyttäytymistä lyhyillä aallonpituuksilla siten, ettei tietyssä lämpötilassa olevassa säteilyssä ole riittävästi energiaa, jotta suurienergisistä kvantteja emittoituisi. Haastattelussa tämä ei kuitenkaan viittannut säteilyn etenemiseen kvantteina.

## B. Valosähköinen ilmiö

Haastattelun pohjana käytetyssä valosähköiseen ilmiöön liittyvässä tehtävässä Aapoa pyydettiin selittämään koejärjestelyyn liittyvä ilmiö.

*”Mihin ilmiöön kuvassa oleva laitteisto liittyy? Selitä kyseinen ilmiö.”*

”Valosähköiseen ilmiöön. Siinä sm-säteily (valo) irrottaa elektroneja metallin pinnasta. Elektroneilla on jokin minimi-irrotustyö  $W_0$ , jonka verran elektroni tarvitsee energiaa vapautuakseen. Elektronin irrottamiseksi on jokin rajataajuus, jota pienemmillä taajuuksilla elektroneja ei irtoa ( $W_0 = h\nu$ ). Raja-taajuuden yläpuolella intensiteetti vaikuttaa irtoavien elektronien määrään, mutta alapuolella sillä ei ole vaikutusta, koska elektroneja ei irtoa.”

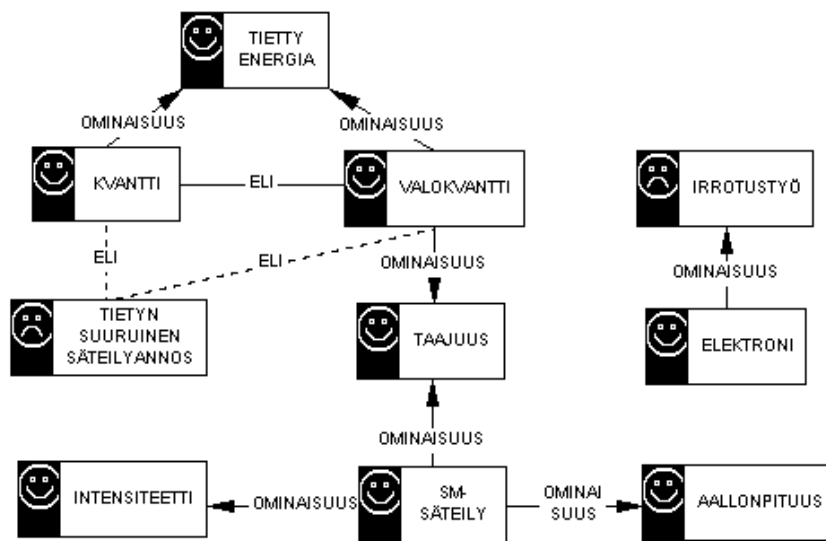
Kysyttäessä miten kvantittuminen liittyy valosähköiseen ilmiöön Aapo esitti seuraavaa:

- Silleen että se, sillä valokvantilla, joka osuu siihen metallin pintaan, nii sillä täytyy olla se tietty energia, ennen kuin se irrottaa niitä elektroneja, jotta vaikka niitä sitten, alemmilla taajuuksilla tulis kaks ni, ei siitä lähe. Se elektroni.

Tulkinta. Aapo hallitsi valosähköisen ilmiön taajuusriippuvuuden mainiten rajataajuuden ja irrotustyön käsitteet. Irrotustyön käsitteen yhteydessä hänen viittauksensa ”elektroneilla on jokin minimi-irrotustyö” ei ole tieteellisen käsityksen mukainen, koska irrotustyö on materiaalille ominainen suure, joka kertoo elektronien irrottamiseksi vaadittavan minimienergian määrän. Kyse voi toisaalta olla kielellisestä huolimattomuudesta. Aapo ymmärsi myös säteilyn intensiteetin vaikutuksen valosähköiseen ilmiöön ja tulkinnan, jonka mukaan yksi kvantti irrottaa yhden elektronin.

### C. Aapon käsiteverkko kolmannessa haastattelussa

Aapon elektronin ja fotonin ontologiaan liittyvistä kolmannen haastattelun vastauksista muodostettua käsiteverkkoa esittää kuvio 5.7. Käsiteverkon huomattavin piirre on, että ensimmäistä kertaa hän liitti aalto-ominaisuuden, taajuuden, fotonin ominaisuudeksi. Aapo ei kuitenkaan käyttänyt fotonin käsitettä vaan sen historiallisia edeltäjiä.



**Kuvio 5.7.** Aapon kolmannen haastattelun perusteella muodostettu käsiteverkko. Aloituskäsitteet on merkitty huutomerkillä, tieteellisen käsityksen mukaiset käsitykset positiivisella hymiöllä ja sen vastaiset negatiivisella hymiöllä. Mikäli käsite liittyy hyväksyttävällä tavalla vain toiseen kvanttiolioon, on kuviossa käytetty symbolitonta laatikkoa. Lisäksi tieteellisen käsityksen vastaiset kytkeytyvät on osoitettu katkoviivalla.

#### 5.3.4 Loppukoe ja neljäs haastattelu

Aapon loppukoevastauksista käsitellään niitä, joissa ilmeni tutkimuksen kohteena olevien ilmiöiden tai käsitteiden ymmärtäminen tai sen ongelmat. Neljännessä haastattelussa läpikäytiin joitakin hänen tenttivastauksiaan STR-menetelmää osittain soveltaen.

## A. Mustan kappaleen säteily

Loppukokeen tehtävässä tarkasteltiin mustan kappaleen säteilyä ja säteilylakeja. Mustan kappaleen teorian lisäksi opiskelijan tuli määrittellä musta kappale käsitteenä (ks. liite 3, s. 250)

”Musta kappale on ideaalinen kappale, joka absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn. Mustan kappaleen säteilyn mallina käytetään onttoa kappaletta (onkaloa), jossa on pieni reikä. Kappale asettuu lämpötasapainoon ja sen sisälle syntyy seisovia aaltoja ja spektriä voidaan havainnoida reiän kautta. Spektri on jatkuva, koska kappale on saavuttanut lämpötasapainon (Maxwell-Boltzmannin jakauma). Sm-säteily (lämpö) johtuu kiihtyvistä ja hidastuvista varauksista, kuten lämpöliikkeeseen liittyvässä värähtelyssä.”

Haastattelussa Aapo määritteli mustan kappaleen samalla tavalla kuin loppukokeessa. Säteilyn absorboitumista hän selitti seuraavasti:

- No se imee sen [säteilyn] itteensä. Se lämpenee esimerkiksi sen vaikutuksesta, valon, kaiken näkyvän valon esimerkiksi, se näyttää (()) mustalta, se ei heijasta valoo ollenkaan.

- *Näyttääkö se mustalta se musta kappale?*

- No jos se ei heijasta mitään, niin kyllähän se näyttää. Tai se näyttää että sielä ei oo mitään.

Mustan kappaleen lämpeneminen johtui Aapon mukaan siitä, että esimerkiksi valon tapauksessa valokvantissa oleva energia lisää atomien ja molekyylien värähtelyä.

- *Sie sanoit, että kun se absorboi, niin se lämpenee, mistä se johtuu?*

- No kun, siinä on sitä energiaa siinä, esimerkiksi jos se valoo absorboi, ni siinä valokvantissa.

- *Sitten sille energialle tapahtuu? Miks se aiheuttaa sen lämpenemisen?*

- No se muuttuu (...) lämpöenergia nyt on väärä sana mutta (...) ne rupee ne, mitä siinä mustassa kappaleessa nyt onkaa, atomeja ja molekyyliä, ne rupee sitten värähtelemään kovemmin siinä (()) sitovat energiaa.

Tulkinta. Aapo esitti sähkömagneettisen säteilyn, lämmön, aiheutuvan kiihtyvistä ja hidastuvista varauksista. Klassisen sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismien mallin mukaan kiihtyvät ja hidastuvat varaukset toki synnyttävät sähkömagneettista säteilyä. Mustan kappaleen säteilyn syntyä ei kuitenkaan voida selittää yksistään klassisella säteilyn synnyn mekanismeilla. Sähkömagneettisen säteilyn ja lämmön käsitteiden rinnastaminen toisiinsa ei ole tieteellisesti hyväksyttävää.

Aapon käsitys mustan kappaleen mustasta väristä oli virheellinen. Adjektiivilla ”musta” viitataan mustan kappaleen yhteydessä siihen, että se ei heijasta lainkaan säteilyä, kuten hän totesikin. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että kappale havaittaisiin väriltään mustana. Esimerkiksi hehkuvan kuuma metallikappale emittoi mustan kappaleen säteilyä. Tieteellisen käsityksen mukaan materiaalin väri selittyy näkyvän valon ja materian välisellä vuorovaikutuksella ja erityisesti tiettyjen valon aallonpituuksien absorboitumisella. Heijastuvat valon aallonpituudet määräävät materian värin sellaiseksi kuin sen havaitsemme. Mustan kappaleen tapauksessa kyse on kuitenkin hehkuvasta kappaleesta, jonka havaittava väri johtuu sen emittoimasta säteilystä.

Mustan kappaleen yhteydessä ei ole perusteltua puhua valon absorboitumisesta, kuten Aapo teki, koska musta kappale nimenomaan absorboi kaikkia sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksia. Hän käytti valon absorboitumista selittäessään valokvantin käsitettä. ”Valokvantissa on energiaa” on ontologisesti virheellinen sanontatapa, koska säteilykentän tilaa kuvaava fotoni välittää energiaa, liikemäärää ja pyörimismäärää vuorovaikutuksessa materian kanssa. Aapo vaikutti ajattelevan, että fotonin energia muuntuu mustan kappaleen rakenneosien liike-energiaksi eli hän loi hybridimallin yhdistämällä kvanttimallin ja klassisen aineen rakenneosamallin toisiinsa. Aineen lämpenemisen selittämiseen rakenneosamallin avulla ei tarvita fotonin käsitettä, vaan myös säteilykenttää voidaan kuvata klassisen mallin avulla.

Aapo viittasi seisovan aaltoliikkeen muodostumiseen mustan kappaleen sisälle, mutta hänen vastauksestaan ei käynyt ilmi, miten hän sen käsitti. Musta kappale on täydellinen absorboija, kuten tämä sanoikin, mutta myös täydellinen emittoija. Emissiota Aapo ei maininnut loppukokeen ja haastattelun vastauksissaan.

## B. Fotoni ja elektroni, loppukoe

Erään loppukokeen tehtävän aiheena oli fotoni ja elektroni kvanttiolioina. Tehtävässä pyydettiin tarkastelemaan fotonia ja elektronia luonnehtivia ominaisuuksia (ks. liite 4, s. 251). Tätä tehtävää Aapo kommentoi haastattelussa hankalaksi. Hänen vastauksensa olikin melko suppea ja sisälsi ristiriitaisuuksia.

”Fotoni ja elektroni voidaan ajatella kvanttiolioiksi. Tällöin ne eivät ole yksilöityviä, paikkaa ja liikemäärää ei voida tuntea tarkasti (Heisenbergin epätarkkuus pa.  $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ ) vaan puhutaan todennäköisyyksistä. Molempiin liittyy sekä hiukkas- että aaltoluonnetta vaativia ilmiöitä (diffraktio ja törmäykset), joita ei kyetä klassisesti selittämään.

Elektroniin liittyy sekä lepo- että liikemassa, mutta fotonin tapauksessa voidaan puhua vaan suunnatusta liikemäärästä. Elektronia voidaan pitää myös klassisena oliona, fotonia ei. Fotoni on välittäjähiukkanen, elektroni alkeishiukkanen (leptoni).”

Muissa tenttitehtävissä Aapo ei käyttänyt fotonin käsitettä, mutta seuraavat fotonin käsitteeseen liittyvät yksittäiset ilmaisut esiintyivät:

”[Einsteinin valosähköisen ilmiön] kaavassa näkyy materian ja säteilyn välisen energianvaihdon kvantittuminen.”

”Comptonin sironta ja siihen liittyvä kaava ovat selkeä osoitus valon hiukkasluonteesta.”

Elektroniin Aapo viittasi valosähköisen ilmiön yhtälöä selittäessään:

”Kaavan mukaan elektronin suurin mahdollinen liike-energia riippuu vain taajuudesta, ei intensiteetistä.  $W_0$  on aineelle tyypillinen vakio ja kaikki elektronit eivät irtoa sen suuruksella työllä, vaan se on minimienergia, jolla herkimmin irtoavat => elektronien energia  $E < E_{\max}^{\text{kin}}$  yleensä.”

Tulkinta, loppukoe. Aapon vastauksen perusteella hänen oli vaikea ymmärtää elektronin kvanttiolioisuutta. Hän piti elektronia sekä klassisena että kvanttioliona. Aapo myös luokitteli elektronin alkeishiukkaseksi, leptoniksi, perustelematta asiaa sen tarkemmin. Elektroni toki näyttäytyy klassisen hiukkasen kaltaisena useissa klassisissa malleissa, ja esimerkiksi elektronisuihkua voidaan kiihdyttää sähkökentän ja ohjata magneettikentän avulla. Näissä tilanteissa elektronin kvanttiolioisuus ei tule esille, eikä sitä tarvitse huomioida.

Fotonin kvanttiolioisuuden ymmärtäminen oli Aapolle hänen vastauksensa perusteella ristiriidatonta. Hän totesi, että fotonia ei voida pitää klassisena oliona. Hän määritteli fotonin välittäjähiukkaseksi avaamatta kuitenkaan tarkemmin käsitteen merkitystä.

Aapo ymmärsi fotonin ja elektronin kvanttiolioisuuteen liittyvän yksilöityvyyden, paikan ja liikemäärän epätarkkuuden Heisenbergin mukaan sekä todennäköisyyden käsitteen. Nämä käsitteet jäivät kuitenkin maininnan tasolle. Hän myös viittasi ilmiöihin, joita ei pystytä klassisesti selittämään hiukkas- ja aaltoluonteen tähden. Aapo mainitsi esimerkkeinä ilmiöistä diffraktion ja törmäykset. Törmäyksillä tämä ilmeisesti viittasi säteilyn ja aineen välisiin vuorovaikutustapahtumiin, joita mallinnetaan elektronin ja fotonin ”törmäyksillä”.

Massan käsitteen Aapo liitti elektroniin lepo- ja liikemassan muodossa, mutta sanoi fotonilla olevan vain suunnattu liikemäärä. Hänen vastauksensa perusteella ei käynyt ilmi, mitä hän ajatteli elektronin liikemassasta. Fotoniin hän ei massa-ominaisuutta liittännyt lainkaan.

Muista tehtävistä kootut ilmaisut vaikuttivat ulkoa opitun tiedon toistamiselta, koska Aapo ei ole perustellut niitä. Käsitteet energianvaihdon kvantittuminen ja hiukkasen aaltoluonne eivät lisäksi integroituneet kvanttiolioita käsittelevän tehtävän vastauksiin. Myös Comptonin ilmiön liittymistä valon hiukkasluonteeseen hän olisi



voinut hieman selittää. Valosähköisen ilmiöön liittyvän vastauksen perusteella tämä ymmärsi nyt irrotustyön materian ominaisuudeksi, ei elektronin.

### C. Fotoni ja elektroni, haastattelu

Haastattelussa Aapoa pyydettiin kertomaan, mitä hänen aiempi ilmaisunsa ”fotoni on välittäjähiukkanen” tarkoittaa. Hän selitti fotonin välittävän sähkömagneettista vuorovaikutusta ja kommentoi fotonin olemusta seuraavasti.

- Tuo on kyllä tietysti hämärä siinä mielessä, kun ajattelee valoo ja sitte ajattelee (-) sähkökenttää (-) ja magneettikenttää (-) no yleisestikin välittäjähiukkanen niin se, kun se välittää sitä vuorovaikutusta, niin siitä sitten voi seurata jotain, joku voima esimerkiks näin, mutta (-) fotoni sitten välittää energiaa, mutta nyt mä en osaa oikeen siihen vastata, jotta miten sitten sähkökenttä ja magneettikenttä, jotta onko niissäki sitten fotoneita. Tuskin on.

Kysyttäessä eikö fotonilla ole massaominaisuutta, Aapo kertoi, ettei fotonilla ole lepomassaa, ja liikemassa on väärä termi, koska se saadaan lepomassan avulla. Hän kuitenkin totesi, että fotoniin liittyy massan käsite, koska fotonin liikemäärä saadaan fotonin massan ja valon nopeuden tulona. Fotonin liikemäärän tämä määritteli massan ja nopeuden  $c$  tulona.

Aapolle palautettiin mieleen hänen loppukokeen vastauksensa, jossa hän toi esille, ettei fotonia voida pitää klassisena oliona kuten elektronia.

- No varmaan jotain ihan näitä peruskokeita, mihin elektroniä käytetään, jotta se käyttäytyy ihan niinku joku klassinen hiukkanen, niinku protonitkii, sähkökentässä. Siihen mä oon varmaanki ajatellu sitä (-) liittyvän (-) mutta fotoni tuskin voidaan ajatella klassisena hiukkasena.

- *Minkä takia ajattelet että ei voida?*

- Sitä nyt ei oikeen voi ajatella ees hiukkasena, se on vaan hiukkasluonne.

Tulkinta, haastattelu. Aapo ei vielääkään vaikuta ymmärtävän, mitä väittämä ”fotoni on välittäjähiukkanen” tarkoittaa<sup>49</sup>. Ongelmalliseksi käsitteen tekee se, että hänen mielikuvansa mukaan välittäjähiukkasen välittäessä vuorovaikutusta seuraa voima, mutta fotoni sen sijaan kuljettaa energiaa. Aapo ei liittänyt fotonia vuorovaikutustapahtumaan, vaan ilmeisesti ajatteli valon koostuvan fotoneista. Hän pohti valon tasoaaltomallin avulla onko sähkö- ja magneettikentissäkin fotoneja, mutta

---

<sup>49</sup> Fotoni on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen eli se siirtää energiaa, liikemäärää ja pyörimismäärää vuorovaikutuksessa materian kanssa.

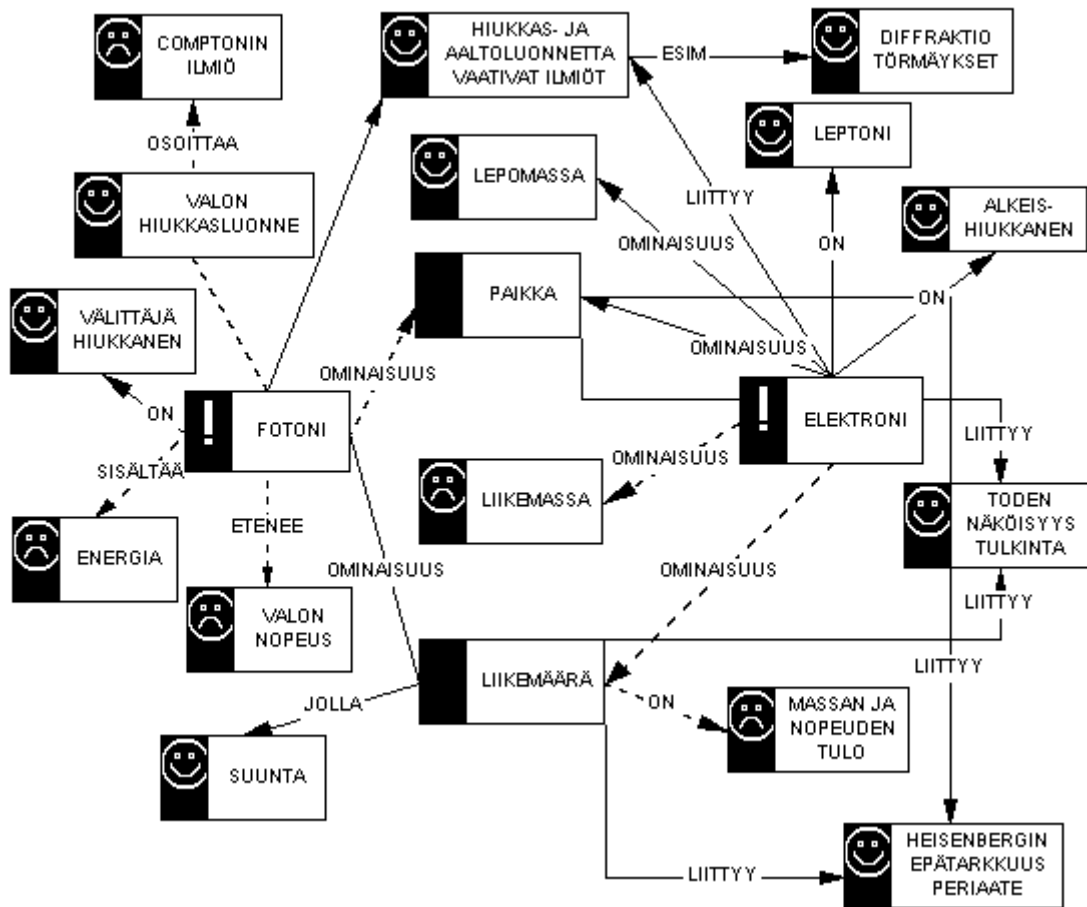
pohdinta johti ristiriitaan valon rakenneosamallin kanssa. Hän myös totesi, ettei fotoneja ei voida pitää hiukkasina vaan hiukkasluonteena.

Aapo perusteli asiallisesti fotonin massattomuutta, mutta fotonin liikemäärän hän käsitti edelleen klassisesti nopeuden (fotonin tapauksessa valon nopeuden) ja massan tuloksi. Fotonin massallisuuden tämä perusteli liikemäärän avulla.

Aapo oletti elektronin klassiseksi olioksi, koska elektroni käyttäytyy klassisen hiukkasen, kuten protonin, tavoin esimerkiksi sähkökentässä. Hänen ymmärryksensä kvanttiolioisuudesta vaikutti kommentin perusteella vaatimattomalta, sillä myös protoni on kvanttiolio kuten elektronikin.

#### D. Aapon käsiteverkko loppukokeessa ja neljännessä haastattelussa

Aapon elektronin ja fotonin ontologiaan liittyvistä lopputestin ja neljännen haastattelun vastauksista muodostettua käsiteverkkoa esittää kuvio 5.8. Käsiteverkossa on symmetrisyyttä, mutta edelleenkin ongelmia aiheuttavat käsitteet massa, valon hiukkasluonne ja klassinen liikemäärä.



**Kuvio 5.8.** Aapon loppukokeen ja neljännen haastattelun vastausten perusteella muodostettu käsiteverkko. Aloituskäsitteet on merkitty huutomerkillä, tieteellisen käsityksen mukaiset käsitteet positiivisella hymiöllä ja sen vastaiset negatiivisella hymiöllä. Mikäli käsite liittyy hyväksyttävällä tavalla vain toiseen kvanttiolioon, on kuviossa käytetty symbolitonta laatikkoa. Lisäksi tieteellisen käsityksen vastaiset kytkeytyvät on osoitettu katkoviivalla.

### 5.3.5 Viides haastattelu

Viides haastattelu toteutettiin viivästetysti noin viisi kuukautta kurssin päättymisen jälkeen. Haastattelun tavoitteena oli selvittää, miten elektroni ja fotonit liittyvät Aapon mustan kappaleen säteilyn ja Comptonin ilmiön ymmärrykseen. Lisäksi haastattelussa keskusteltiin fotonista ja elektronista kvanttiolioina. Aapo kertoi, ettei ole kerrannut kurssiin liittyvää materiaalia haastattelua varten, joten haastattelua voitaneen pitää aidosti viivästettynä.

#### A. Mustan kappaleen säteily

Aapo määritteli mustan kappaleen kappaleeksi, joka absorboi ja emittoi kaiken siihen tulevan säteilyn, kaikki sen aallonpituudet. Hän kuvasi säteilyn absorboitumista ja emittoitumista mustassa kappaleessa seuraavasti:

- Kun siihen absorboituu sitä energiaa ni (-) siirtyy korkeemmille atomit, kautta elektroni, korkeemmille energiatiloille, että ne värähtelee sitte enemmän ja tuota (-) mutta siinä on taas se kvanttifysiikka, jotta se ei oo (...) jatkuvaa, vaan siinä on (...) tiettyjä tiloja, mihin se voi mennä että se (...) kvanteittain ottaa sitä energiaa vastaan ja sitten samalla tavalla myös luovuttaa että vaan tietyille tasoille voi mennä.

Tulkinta. Aapo hallitsi mustan kappaleen määritelmän. Selittäessään mustassa kappaleessa tapahtuvaa absorptiota ja emissiota hän kertoi sekä rakenneosien värähtelyn lisääntymistä että elektronien virittymisestä korkeemmille energiatiloille eli muodosti hybridimallin kahdesta eri mallista. Hän kuitenkin ymmärsi, ettei energianvaihto ole jatkuvaa, vaan kvantittunutta.

#### B. Comptonin ilmiö

Aapo muisteli, että Comptonin ilmiössä esimerkiksi elektroniin kohdistetaan säteilyä, jolloin eri aallonpituisia säteilykvantteja lähtee kahteen eri suuntaan.

*- Sitten Comptonin ilmiöstä seuraavaks. Mitä sillä tarkotetaan?*

- (-) Nii se oli se (-) Comptonin sironta. (-) Mites se nyt menikää (-) no joka tapauksessa siinä (-) eihän näitä muista enää (-) olikse se nyt, että (-) johonkii, elektroniin esimerkiks, kohdistetaan sitä säteilyä, tai johonkii sitä kumminkii kohdistettiin, siitä lähtee sitten kahteen suuntaan niitä (-) säteilykvantteja ja niillon eri aallonpituus.

Aapo totesi, että ilmiö voitiin selittää liikemäärän säilymislain avulla. Hänen mukaansa ilmiö tapahtuu säteilyn ollessa riittävän energieettistä eli sen aallonpituus on riittävän pieni.

Tulkinta. Aapon ymmärrys Comptonin ilmiöstä oli heikko. Hän esitti, että säteilyä kohdistetaan elektroniin, mikä ei ole tieteellisen näkemyksen mukaista. Hän kertoi säteilyn energian olevan kääntäen verrannollinen sen aallonpituuteen. Itse asiassa tämä pätee vaan fotonin energialle, joka on Planckin vakion ja taajuuden tulo.

### C. Elektroni

Vastauksensa perusteella Aapo vaikutti ajattelevan, että elektroneja voidaan havaita klassisissa kokeissa, kuten irrotettuja elektroneja kiihdytettäessä magneettikentällä ja elektronien taipuessa sähkökentässä. Kysyttäessä missä ilmiöissä elektronin kvanttiluonne voidaan havaita hänelle tuli mieleen ainoastaan diffraktio.

- (-) Diffraktioilmiössä, elikkä kaks pientä aukkoa (-) ni sitten se ei käyttäydykään niinku haulit vaikka kun sitä pommitetaan tai tulee se elektronisuihku, sieltä tulee semmonen diffraktiokuvio niinku valollaki.

Pyydettyessä Aapoa argumentoimaan elektronin kvanttiluonetta, tämä käytti aluksi perusteluna mainitsemaansa diffraktiota, jossa elektroni ”toimii kvanttifysiikan mukaan, eikä sitä voida selittää klassisesti”. Hetken mietittyään Aapo muisteli myös Comptonin ilmiön liittyvän elektronin kvanttiluonteeseen.

- (-) En mä kyllä millään muulla osaa sitä todistaa että (-) mitä muita siitä löytys niitä. (-) Tai hetkonen. (-) No niin no ehkä se Comptonin ilmiö liittyy, koska elektroni siinä oli mukana nii ehkä sen Comptonin ilmiö, mutta kun mä en ihan sitä tarkkaan osaa sitä kuvailla, mutta elektroni siinä joka tapauksessa oli se johon niitä, kohdistettiin sitä säteilyä.

Aapo ei kuitenkaan osannut kertoa, mitä sellaista elektronista tulee Comptonin ilmiössä esille, jota ei voida selittää klassisesti.

Tulkinta. Aapo vaikutti ajattelevan, että elektronien havaitseminen on mahdollista. Itse elektroneja ei kuitenkaan voida koskaan havaita, vaan niiden olemassaolosta ja ominaisuuksista voidaan tehdä päätelmiä ilmiöiden kautta. Lisäksi hän sanoi virheellisesti, että elektroneja voidaan kiihdyttää magneettikentällä, vaikka elektronisuihkun kiihdytys voidaan suorittaa sähkökentän avulla, ja sen ohjaamiseen käytetään magneettikenttää.

Elektronien kvanttiluonteen Aapo ymmärsi ilmenevän kaksoisrakokokeessa, jota kutsui kuitenkin diffraktioilmiöksi. Hänen selityksensä elektronin käyttäytymiselle kaksoisrakokokeessa oli tieteellisesti hyväksyttävä. Hän muisteli elektronin kvanttiluonteen ilmenevän myös Comptonin ilmiössä, mutta ei kuitenkaan osannut

kertoa miten. Tämä on ymmärrettävää hänen Comptonin ilmiön ymmärryksensä taso huomioon ottaen.

#### D. Fotoni

Fotoneja voidaan Aapon mukaan havaita esimerkiksi valokennon avulla, johon muodostuu jännite fotonien osuessa siihen. Hän kertoi fotonien havaitsemisen olevan mahdollista myös valosähköisessä ilmiössä, jossa voidaan tutkia valon aallonpituuksia ja lisäsi fotoneja voitavan havaita myös diffraktiossa.

Aapon mukaan fotonin *kvanttiluonteesta* voidaan saada tietoa valosähköisen ilmiön avulla.

- (-) No siinä on, valosähköisessä ilmiössä kun sitä (-) hetkosen, siinä siis irtoaa elektroneja jostaki metallin pinnasta esimerkiksi (-) ja siinähan piti nyt olla se tietty rajataajuus, että se energia ei ikäänkun kasaannu siihen vaan se on kvantittunu siinä, myös siinä (-) säteilyssä mikä siihen kohdistetaan, et se täytyy ylittyä se rajataajuus.

- *Mitä se tarkoittaa se kvantittuminen?*

- (-) Että se ei oo jatkuva.

Fotonin kvanttiluonnetta Aapo perusteli diffraktiolla ja valosähköisellä ilmiöllä. Hänen mukaansa elektronin kvanttiluonne tulee esiin valosähköisessä ilmiössä siten, että elektroni ei pysty keräämään fotonin energiaa. Fotonin massattomuus on hänen mukaansa myös osoitus sen kvanttiluonteesta.

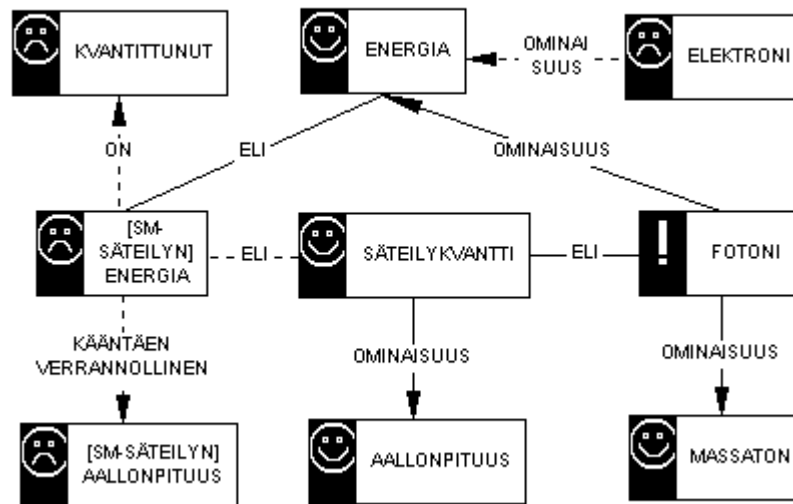
- (-) No, diffraktio (-) no en tiä sitten, että valosähkönen ilmiö, ehkä se valosähkönen ilmiö on myös sitte (-) aiheuttas tavallaan sen elektronin kvanttiluonteen sitten myös, et se ei pysty keräämään sitä fotonin energiaa. Mutta (-) diffraktio ja sitten se (-) sen massattomuus et se on massaton (-) ja enpä mie nyt muuta osaa sanoo tuohon.

Tulkinta. On vaikea sanoa, ymmärsikö Aapo, ettei fotoneista voida tehdä suoria havaintoja. Hän ei ainakaan näyttänyt käsittävän, että valokennon toiminta perustuu juuri valosähköiseen ilmiöön. Myös fotonin yhteydessä hän viittasi diffraktioon, jolla ilmeisesti tarkoitti kaksoisrakokoetta, kuten aiemmin elektronin yhteydessä. Aapo ei kuitenkaan selittänyt, miten fotonin kvanttiluonne ilmenee kokeessa. On totta, että suoritettaessa kaksoisrakokoe intensiteetiltään heikolla valolla havaitaan varjostimella yksittäisiä osumia, jotka ovat seurausta valon vuorovaikutuksesta varjostimen kanssa. Nämä niin sanotut hiukkahavainnot voidaan tulkita osoitukseksi valon hiukkasluonteesta.

Aapon esitti valosähköisen ilmiön yhteydessä metallin pintaan tulevan säteilyn energian olevan kvantittunut eli epäjatkuva, joten hän ei vaikuttanut yhdistävän energian kvantittumista säteilykentän ja materian väliseen vuorovaikutukseen.

#### E. Aapon käsiteverkko viidennessä haastattelussa

Aapon elektronin ja fotonin ontologiaan liittyvistä viidennen haastattelun vastauksista muodostettua käsiteverkkoa esittää kuvio 5.9. Käsiteverkko on melko suppea, eikä sisällä lainkaan elektronia koskevia ominaisuuksia.



**Kuvio 5.9.** Aapon viidennen haastattelun vastausten perusteella muodostettu käsiteverkko. Aloituskäsitteet on merkitty huutomerkillä, tieteellisen käsityksen mukaiset käsitykset positiivisella hymiöllä ja sen vastaiset negatiivisella hymiöllä. Mikäli käsite liittyy hyväksyttävällä tavalla vain toiseen kvanttiolioon, on kuviossa käytetty symbolitonta laatikkoa. Lisäksi tieteellisen käsityksen vastaiset kytkeytymiset on osoitettu katkoviivalla.

#### 5.3.6 Aapon suhtautuminen kurssiin

Aapon kurssiin suhtautumisen arviointi perustuu pääosin hänen vastauksiinsa ja kommentteihinsa lopputestin yhteydessä toteutetussa palautekyselyssä. Lisäksi hän kommentoi joitakin kurssiin liittyviä seikkoja myös neljännessä haastattelussa ennen lopputestiä.

## A. Kurssin sisältö ja taso

Aiheiden käsittelyn tahti oli kurssilla Aaposta sopiva. Hänen mielestään oli hyvä, ettei kurssi painottunut vahvasti matemaattiseen formalismiin. Hän koki, ettei kurssimateriaalia käyty läpi kovin tarkkaan, vaan osa siitä jäi oman kiinnostuksen varaan. Aapo myös totesi, että kaikkia kurssilla käsiteltyjä aiheita olisi voinut laajentaa mikäli niin olisi haluttu. Ilmeisesti hänelle jäi mielikuva, ettei kurssilla opetettu mitään aiheita ”umpeen”, vaan kurssin opetusmallit ovat laajennettavissa ja täydennettävissä.

Aapo kertoi, että hänen on vaikea arvioida kurssin vaativuutta ja oppimistavoitteita, koska lopputesti oli vasta tulossa. Tämä kuitenkin arveli, että kurssi on hieman ”kevyempi” kuin esimerkiksi eräät cum laude -kurssit. Tarkemmin mietittyään hän toteasi kurssin olleen vaativuustasoltaan ihan sopiva. Aapo kuitenkin lisäsi, että mikäli kurssin materiaali pitää hallita kokonaan, niin se on laaja.

Pyydettyessä arvioimaan, olivatko jotkin kurssilla käsitellyt aiheet vaikeita tai helppoja, Aapo mainitsi kokeneensa sironnan ja absorptio- ja emissiotapahtuman välisen eron ongelmalliseksi. Helppona aiheena hän mainitsi cumun töistä tutun valosähköisen ilmiön, joka hänen tarvitsi vain palauttaa mieleen. Lisäksi hän sanoi omaksuneensa kurssilla yleistä tietoa, mutta kurssin aiheet eivät avautuneet hänelle kovin syvästi. Hän kuitenkin arveli näin tapahtuvan, mikäli hän paneutuu kurssimateriaaliin tarkemmin.

Koska Aapo oli opintojensa loppuvaiheessa, kurssi oli hänelle ylimääräinen. Hän kuitenkin piti kurssia mielenkiintoisena ja hyödyllisenä, joten oli mukana loppuun saakka.

- Niin mäkin oon tuolla kurssilla oon ollu sillä tavalla mukana että (...) mä nyt alussa katoin, että jos tää nyt vaikuttaa mielenkiintoiselta niin mä istun täälä ja (...) jos sitten tuntuu että täältä ei saa mitään irti niin sitten mä en sitä ottanu. Mutta tää nyt tuntuu että jotain sieltä on saanu kumminkii, sen verran irti et mä oon sielä ollu.

Aapon vastaukset lopputestin yhteydessä toteutettuun palautekyselyyn olivat linjassa haastattelun kurssin työmäärää ja sisällön määrää koskevien vastausten kanssa. Ilmeisesti tenttiin lukeminen oli avannut Aapolle kurssin sisältöä, koska kyselyssä hän vastasi olevansa samaa mieltä väittämän ”Kurssi antoi minulle valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita” kanssa.

Kysyttäessä Aapon tuntemuksia kurssilla opiskeltavien aiheiden tuttuudesta, tämä myönsi, että kurssi oli ollut aiheiden mieleen palauttamista ja niiden syventämistä. Hänestä tuntui, että ”jos kaikki muistais, mitä on aikasemmin ollu, niin sitte ehkä osais niitä tehtäviäkii paremmin tehdä etukäteen”.



Kotitehtävät, ja erityisesti laskutehtävät, olivat Aapon mukaan ”tosi simppeleitä, ei niitä tehdessä menny kauaa”. Tehtävien lukumäärä oli hänen mielestään sopiva, vaikka hän ei ollut tottunut sanallisiin tehtäviin.

- *Oisko niitä [laskutehtäviä] pitäny olla siun mielestä enemmän?*

- En mä nyt oikeestaan usko ja ehkä se, vaikka siihen nyt ei ollukaan tottunu, et siinä oli sitten niinku muitakii tehtäviä kun niitä laskutehtäviä ni ehkä (...) niitä laskutehtäviä ei sen enempää tarte ollakkaan (...) muutaki pohtimista niihin liitty ni se oli ehkä ok.

Aapon loppukyselyn kurssin vaatavuustasoa koskevat vastaukset ovat samankaltaisia kuin haastattelussa saatu mielikuva. Kurssi yleisesti ei ollut hänestä vaativa eikä helppo. Tausta- ja luentotehtävät hän koki melko vaativiksi ja kotitehtävät melko helpoiksi.

## B. Opetusmenetelmät

Aapon mukaan tarkasteltava kurssi vaikuttaa opiskelumenetelmien tehokkuuteen. Hän oppii mielestään tehokkaasti kursseilla, joissa harjoitukset liittyvät luentoaineistoon ja ovat luentomateriaalin soveltamista. Joillakin kursseilla, samoin kuin tällä, tämänkaltaisten tehtävien laatiminen olisi ollut Aapon mielestä hankalaa. Hän teki kotitehtävät yksin, osaksi käytännön syistä ja osaksi siksi, etteivät muut kurssin osallistujat olleet hänelle tuttuja.

Asioiden pohtiminen tehtäviä tehdessä olisi ollut Aapon mukaan hyödyllisempää, jos opetuksessa olisi annettu enemmän taustatietoa. Opittua tietoa soveltavia tehtäviä hän olisi kaivannut myös luennoille. Hän kuitenkin koki pohdiskelun hyödylliseksi ilmiöiden tarkastelun yhteydessä. Monet ilmiöitä olivat Aapolle vain nimenä tuttuja, joten ilmeisesti tehtävät olivat hänelle aika vaativia.

Loppukyselyn vastausten mukaan Aapo piti vuorovaikutteista opetustyyliä melko hyvänä ja perinteistä melko huonona oman oppimisensa näkökulmasta. Taustatehtäviin hän suhtautui neutraalisti ja kotitehtäviä hän piti melko hyvinä.

Aapo oli läsnä lähes kaikilla kurssin luennoilla, toi esille omia näkemyksiään ja kommentoi opetuksessa käsiteltäviä aiheita. Hän myös osallistui tausta- ja luentotehtävien tekemiseen aktiivisesti opetuksen aikana. Vaikka hän toi ensimmäisessä haastatteluissa ilmi, että kurssille osallistuminen ei ole hänelle välttämätöntä opintoviikkojen saamisen suhteen, hän kuitenkin vaikutti innostuvan kurssin opiskeluun. Luentotehtävät, joiden ajatuksena oli oppia tarkasteltavaa aihetta ongelmanratkaisutyypisesti, eivät nähtävästi olleet Aapon oppimistyyliille kovin sopivia. Hänen mielestään perinteiset, taustamateriaalissa esitetyn tiedon soveltamiseen keskittyvät tehtävät olisivat olleet tehokkaampia.

Aiempien kurssien tiedon käyttäminen oli Aapolle vaikeaa. Tämä tuli ilmi kurssiarviointia koskevassa haastatteluissa kuten myös aiemmissa haastatteluissa. Haastattelujen perusteella hän vaikutti pintasuuntautuneelta oppijalta, joka ei tietoisesti tähtää ymmärtämiseen. Myöskään hänen metakognitiiviset taitonsa eivät vaikuttaneet kovin kehittyneiltä. Hän ei esimerkiksi pystynyt arvioimaan oppimistaan kurssilla tai kurssin vaikeustasoa, koska ei ollut osallistunut lopputestiin. Samoin haastatteluissa selvästi esille tulleet puutteet tiedoissa eivät ilmeisesti innostaneet häntä täydentämään tietämystään opiskelemaan asioita itsenäisesti kurssin ulkopuolella. Klassisen fysiikan perusteiden hallinnassa ilmenneet puutteet saattoivat vaikuttaa kurssilla käytettyjen tehtävien mielekkyyteen.

Haastateltavana Aapo oli ensimmäisissä haastatteluissa lyhytsanainen, eikä suostunut esittämään juurikaan omia arvailuja tai tulkintoja epävarmoiksi kokemistaan aiheista. Vähitellen hän kuitenkin tuli rohkeammaksi ja esiintyi haastatteluissa rennommin. Leimallista hänelle oli kanonisten puolitotuuksien käyttö (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1998). Hän määritteli käsitteet ja ilmiöt käyttäen toisia, joskus jopa alkuperäisiä käsitteitä abstraktimpia, käsitteitä. Näiden uusien käsitteiden merkityksiä Aapo ei aina ymmärtänyt tai ymmärsi niiden merkitykset virheellisesti.

## 5.4 Tapausopettaja Timo

Timo oli työskennellyt muutaman vuoden lukion opetustehtävissä. Timon haastattelut noudattivat samanlaista protokollaa kuin tapausopettaja Tuomaan haastattelut (ks. s. 106-129), mutta hänen oppimisprosessinsa kuvataan tiivistetyssä muodossa.

### 5.4.1 Peruskäsitteet ja -ilmiöt kurssin alussa

#### **Absorptio ja emissio**

Tapausopettaja Timon esitestissä ja haastattelussa konstruoimat mallit olivat enimmäkseen klassisten ja kvanttimallien piirteiden yhdistelmiä eli niin sanottuja hybridimalleja. Hänen esille tuomissaan esimerkeissä energia ja energianvaihto esiintyivät useimmiten luonteeltaan jatkuvana, eikä hän maininnut energian kvantittumista säteilykentän ja materian välisessä vuorovaikutuksessa. Sähkömagneettisen säteilyn ”heikkenemistä” selittäessään Timo yhdisti klassisen säteilykentän ja atomien virittymisen, mutta ei viittannut niiden vuorovaikutukseen. Haastattelussa ei käynyt ilmi, mitä hän tarkoitti säteilyn heikkenemisellä.

Timo mainitsi emission yhteydessä, että atomista emittoituu energiakvantti. Samoin hän viittasi viivaspektriin syntyyn, joten vaikutti siltä, että hän ymmärtää atomin energian kvantittumisen. Maininnat jatkuvasta energianvaihdosta ja

kvanttuneesta energiasta olivat toistensa kanssa ristiriitaisia, mutta voivat kertoa myös kielellisestä huolimattomuudesta.

### **Sironta**

Timo käsitti sironnan käsitteen liittyvän esimerkiksi alfahiukkasten sirontaan eli niiden suunnan muuttumiseen pommitettaessa niillä kultafoliota. Hänen soveltamansa malli oli täten sironnan klassinen malli. Haastattelussa tämä kertoi sironnan yhteydessä Comptonin ilmiöstä, jota käsitellään tarkemmin myöhemmin.

### **Sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismi**

Timolla oli hyvät tiedot sähkömagneettisen säteilyn lajeista ja tyydyttävät tiedot säteilyn syntymekanismeista. Haastattelussa haettiin säteilyn synnyn klassista ja kvanttimekanismia, mutta tämä ei ilmeisesti kuitenkaan ymmärtänyt kysymystä. Hän kertoi, että säteilyn synnyssä on kyse energian säilymisen periaatteesta; ylimääräinen energia ikään kuin varastoituu hetkellisesti kohteeseen pyrkien minimienergiaperiaatteen mukaisesti alimpaan mahdolliseen energiatilaan, jolloin syntyy säteilyä. Timon aiempien vastausten perusteella hän kuitenkin tunsi säteilyn synnyn kvanttimallin, joka liittyy elektronin viritystilojen muuttumiseen.

## 5.4.2 Kvantti-ilmiöiden oppimisprosessi

### A. Comptonin ilmiö

#### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Timo hallitsi Comptonin ilmiön tyydyttävästi kurssin alussa. Hän kuitenkin kutsui ilmiötä röntgensäteilyn sironnaksi selittäen sen röntgenfotonin törmäyksenä vapaaseen elektroniin nojaten selityksessään energian säilymisen periaatteeseen. Hän ei kuitenkaan viittannut lainkaan liikemäärän säilymiseen tai fotonin liikemäärään. Timo ymmärsi tulevan ja sironneen fotonin eri olioiksi. Hän selitti röntgensäteilyn sironnan johtuvan dualismista eli hiukkasen massan ja jonkin aaltoilmiön, tässä tapauksessa röntgensäteilyn, vastaavuudesta. Tieteellisen käsityksen mukaan dualismilla viitataan aalto- ja hiukkasluonteeseen, eli siihen, että sähkömagneettisen säteilyn tai massallisten kvanttiolioiden käyttäytyminen tietyissä ilmiöissä voidaan tulkita joko hiukkas- tai aallohavainnoiksi. Timon haastattelussa esille tuoma käsitys viittaa puolestaan siihen, että hän sekoittaa toisiinsa dualismin käsitteen ja Einsteinin suhteellisuusteoreettisen yhtälön.

### **Toinen haastattelu**

Toisessa ennen Comptonin ilmiön opetusta suoritetussa haastattelussa Timo tunnisti hänelle esitetyn koasetelman Comptonin ilmiöön liittyväksi ja määritteli sen sironnaksi, jossa aallonpituus muuttuu sirontakulman funktiona. Hän ei kuitenkaan kertonut, miten kulma vaikuttaa aallonpituuteen ja mistä sironta tapahtuu. Kaksihuippuiset sirontaspektrit nollassa poikkeavilla sirontakulmilla olivat Timolle entuudestaan tuntemattomia ja vaikeasti ymmärrettäviä. Hän selitti ilmiön fotonin ja elektronin välisenä tapahtumana, jossa tuleva ja siroava fotonit ovat eri oliot nojaten jälleen energian säilymisen periaatteeseen kuten aiemmassa haastattelussa. Hänen Comptonin ilmiön hallintansa oli tasoltaan tyydyttävää.

### **Lopputesti ja neljäs haastattelu**

Lopputestissä ja neljännessä eli viimeisessä haastattelussa Timon ilmaisema tietomäärä oli aiempiin haastatteluihin verrattuna laajempi, mutta hänellä edelleen esiintyvien ymmärtämisen ongelmien tähden Comptonin ilmiön hallinta oli edelleen vain tyydyttävää tasoa. Lopputestissä hän määritteli Comptonin ilmiön sähkömagneettisen säteilyn sironnaksi eli suunnan muuttumiseksi. Sekä lopputestissä ja neljännessä haastattelussa hän sanoi virheellisesti, ettei elektroneja irtoa Comptonin ilmiössä. Oikein hän kertoo liikemäärän säilyvän Comptonin ilmiössä ja liikemääriä käsiteltävän vektorisuureina. Timo esitti Comptonin ilmiön osoittavan energian ja massan välisen yhteyden ja todistavan säteilyn ja massan vastaavuuden liikemäärän avulla eli jälleen ilmeni hänen erikoinen dualismi-käsityksensä. Hänen käsityksensä fotonin ja elektronin välisestä vuorovaikutustapahtumasta säilyi ennallaan: tulevalla fotonilla on energia, josta osa menee elektronin liike-energiaksi ja osa sironneelle kvantille.

## **B. Valosähköinen ilmiö**

### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Kurssin alussa Timon ymmärrys valosähköisestä ilmiöstä oli tyydyttävä. Esitestissä hän esitti Einsteinin valosähköisen ilmiön yhtälön mainiten irrotustyön käsitteen. Samoin esitestissä Timo kertoi valosähköisen ilmiön todistavan fotonin energian, mutta haastattelussa hän esitti sen olevan osoitus dualismista. Periaatteessa hänen haastattelussa esittämänsä käsitys on oikea, mutta hänen erikoinen dualismi-käsityksensä – massan ja aaltoilmiön vastaavuus - huomioiden se ei ole hyväksyttävä. Vaikka Timo kertoi aiemmin, että valosähköisen ilmiön avulla voidaan määrittää Planckin vakion arvo säteilyn taajuutta muuttamalla, hän ei kokenut sitä ilmiön merkityksellisyyteen liittyväksi tekijäksi. Ilmiön kannalta oleellinen rajataajuuden merkitys puuttuu Timon vastauksesta.

### **Lopputesti ja neljäs haastattelu**

Lopputestin vastauksen ja neljännen haastattelun perusteella Timo hallitsi valosähköisen ilmiön melko lailla opetuksen tavoitteiden mukaisesti keskeiset käsitteet irrotustyö ja rajataajuus halliten. Hän myös esitti Planckin vakion määrittämisen valosähköisen ilmiön avulla sekä lopputestissä että haastattelussa. Hänen erikoinen dualismi-käsityksensä oli kuitenkin luonteeltaan pysyvä.

Timon käsityksen mukaan valosähköinen ilmiö on osoitus massan ja energian välisestä suhteesta: ilmiössä fotonit, sähkömagneettinen säteily, joka on levossa massatonta, mutta jolla on liikkeessä liikemassa ja liikemäärä, saa liikkeelle massallisen partikkelin elektronin. Ensinnäkin sähkömagneettisen säteilyn ja fotonien käsitteitä ei voida käyttää synonyymisinä, ja on perusteetonta puhua sähkömagneettisen säteilyn lepotilasta. Fysiikan näkökulmasta fotonin massa pitäisi ymmärtää hitautena, jos se ylipäätään halutaan fotonin liittää.

Timon tulkinta fotonin ja elektronin vuorovaikutustapahtumalle on erikoinen, ja viittaa esimerkiksi Comptonin ilmiön matemaattisessa tarkastelussa käytettävän kimmoinen törmäyksen mallin soveltamiseen. Valosähköisen ilmiön tarkastelussa on perusteltua käyttää energian säilymisen periaatetta, mutta Timon soveltama ”massan ja energian suhteen periaate”, jolla on ilmeisesti juuret Einsteinin suhteellisuusteoreettisessa yhtälössä, ei ole fysiikan näkökulmasta järkevä.

### C. Mustan kappaleen säteily

#### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Timo hallitsi mustan kappaleen säteilyn esitestissä vaatimattomasti. Hän määritteli sen kaikilla taajuuksilla yhtä voimakkaasti säteileväksi ideaalisäteilijäksi, joka on mahdoton.

Tieteellisen käsityksen mukaan mustan kappaleen säteilyspektri noudattaa sille tyypillistä muotoa, joka riippuu vain mustan kappaleen lämpötilasta. Säteily ei siten ole yhtä voimakasta kaikilla taajuuksilla. Lisäksi ideaalisen mustan kappaleen säteilijän konstruointi on mahdotonta. Ultraviolettikatastrofiksi kutsutaan klassiseen energian tasanjakautumisen periaatteeseen perustuvaa Rayleighin ja Jeansin lain antamaa ennustetta, jonka mukaan säteilyn energiatiheys kasvaa hyvin suureksi jo näkyvän valon aallonpituusalueella. Tämä tilanne on mahdoton.

Haastattelussa Timo ei osannut kertoa juurikaan enempää mustan kappaleen säteilyn aiheesta. Hän yrittää muistella Wienin lain sisältöä, mutta ei muistanut sitä täysin oikein. Vaikka Timo mainitsi Planckin vakion valosähköisen ilmiön yhteydessä, ei hän sitä maininnut mustan kappaleen säteilyn tapauksessa.

## **Toinen haastattelu**

Mustan kappaleen säteilyn opetuksen jälkeen suoritettussa toisessa haastattelussa Timo kertoi vain, että täydellistä mustaa kappaletta ei ole olemassa, mutta aurinko on aika lähellä sitä. Muuta Timo ei suostunut mustan kappaleen säteilystä kertomaan.

## **Lopputesti**

Lopputestissä Timon mustan kappaleen aiheen hallinta oli tyydyttävää tasoa. Hän määritteli mustan kappaleen opetuksessa esitetyn määritelmän mukaisesti. Vastauksesta kuitenkin puuttui ontelosäteilijän malli ja selitys seisovan aaltoliikkeen syntymisestä mustan kappaleen mallina käytetyn onkalon sisälle. Hän osoitti ymmärtävänsä mustan kappaleen säteilyspektrin muodon lämpötilariippuvuuden. Opetuksessa käsitellyn tiedon kanssa ristiriitaisia käsityksiä Timolla ei mustan kappaleen säteilyn yhteydessä ilmennyt kurssin lopussa.

### 5.4.3 Kvanttiolioiden oppimisprosessi

#### A. Käsitys hiukkasesta

#### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Kurssin alussa Timon hiukkaskäsitys oli massakeskeinen ja perustaltaan klassinen mutta sisälsi elinikä-ominaisuuden hiukkasfysiikasta. Hän mainitsi elektronin ja fotonin esimerkkeinä, joiden keskeinen ominaisuus oli massa. Timon mielestä puhekielessä hiukkasella voidaan tarkoittaa esimerkiksi kidettä tai pölyhiukkasta.

#### **Kolmas haastattelu**

Kolmannessa haastattelussa Timo pohti, että onko valoallolla tilavuus, koska ”perinteisellä” hiukkasella on. Havaitsemisen hän mielsi joko ihmissilmin havaitsemisena tai esimerkiksi kenttien havaitsemisena testihiukkasen avulla. Hänen käsityksensä dualismista vaikutti muuttuneen: hän sanoi sen tarkoittavan, että valoallolla on hiukkasluonne. Ilmeisesti Timo ajatteli valon koostuvan valoalloista, jotka ovat hiukkasmaisina.

#### B. Elektronimallin kehitys

#### **Ensimmäinen haastattelu**

Ensimmäisen haastattelun perusteella Timon elektroni oli massallinen ja varauksellinen hiukkanen. Hän ymmärsi, että elektronista ei voida tehdä suoria havaintoja, ja siitä saatava tieto on epäsuoraa. Tämä viittasi katodisädeputkella nähtävään elektronien

synnyttämään ilmiöön, jonka avulla on määritetty elektronin varaus ja päätelty kuvion aiheuttajat elektroneiksi.

### **Toinen haastattelu**

Toisessa haastattelussa Timo kertoi elektronin ominaisuuksiksi negatiivisen alkeisvarauksen, pienen massan, liikemäärän, fyysisen koon, de Broglien hypoteesin ja paikan todennäköisyyden.

De Broglien periaate liittyi hänen mukaansa atomin/elektronin viritystilan laukeamiseen, jossa emittoituu kvantti. Timon ensimmäisessä haastattelussa esittämän käsityksen mukaan dualismi tarkoittaa massan ja aallon vastaavuutta. Hän kertoi elektronin ominaisuudeksi aaltoluonteen ja liitti aallonpituuden sekä taajuuden elektroniin de Broglien hypoteesin kautta. Ilmeisesti hän ymmärsi, ettei elektroniin voida liittää klassista aallonpituutta. Taajuuden käsite sen sijaan ei kuulu de Broglien teoriaan.

Timon mukaan elektroni on jossain paikassa tietyllä hetkellä, mutta elektronin paikka on epätarkka ja vaikea ennustaa. Hänen käsityksensä taustalla voidaan havaita Bornin todennäköisyystulkinta, mutta käsitys on epämääräinen, eikä hän tunnu ymmärtävän todennäköisyyden episteemista luonnetta. Bornin todennäköisyystulkinnan mukaan aaltofunktion amplitudin neliö on verrannollinen hiukkasen todennäköisyyteen esiintyä tietyssä pisteessä tietyllä ajanhetkellä (ks. esimerkiksi Maalampi & Perko 2002).

Tieteellisen käsityksen mukaan elektronilla ei ajatella olevan fyysistä kokoa. Lisäksi liikemäärän liittäminen elektroniin ei ole perusteltua, ellei elektronia tarkastella klassisesti sähkökentässä.

### **Kolmas haastattelu**

Kolmannessa haastattelun perusteella Timon klassinen hiukkasmainen elektronikäsitys ei ole juuri muuttunut. Hän esimerkiksi viittasi klassisiin kokeisiin, joissa elektronisuihkua ohjataan sähkökenttien avulla.

Timon elektronikäsitys vaikutti edelleen organisoitumattomalta. Hän esimerkiksi viittasi elektronin paikan todennäköisyysjakaumasta kertoessaan Heisenbergin periaatteeseen, mutta sen sisällöstä tiesi vain, että se liittyy paikan tai liikemäärän epämääräisyyteen. Kuitenkin kertoessaan elektronin paikan mittaamisesta hän viittasi periaatteen sisältöön implisiittisesti: ”elektronin nopeudet ovat suuret, joten niiden paikka on vaikea määrittää”. Samalla tämä kuitenkin toi esille, että mieltää elektronin etenevän ratoja pitkin klassisten kappaleiden tavoin.

Timolla vaikutti olevan vaikeuksia todennäköisyystulkinnan ymmärtämisessä. Hänen käsityksensä mukaan elektroni voidaan löytää myös atomiorbitaalien ulkopuolelta ja todennäköisyystulkinnan käyttö tekee esimerkiksi paikan määrittämisestä

*vaikeaa*. Hän ei ilmeisesti ymmärtänyt todennäköisyyden luonnetta. Lisäksi hän ajatteli orbitaalien kuvaavan suoranaisesti elektronien sijaintia.

Timo kertoi elektronien paikan mitattaamisen häiritsevän mittausta, jolloin mittaustulos on mitätön. Tämä on oikean suuntainen käsitys mittaamisesta kvanttifysiikassa. Hän myös mainitsi, että elektronin löytäminen oli ongelmallista, koska oli kehitettävä teoria, joka todisti elektronien olemassaolon.

### **Lopputesti**

Lopputestin elektronia ja fonia käsittelevässä tehtävässä (ks. liite 4, tehtävä 4, s. 251) Timo argumentoi sekä elektronin klassisen olioisuuden että kvanttiolioisuuden puolesta. Hän muun muassa mainitsi elektronien paikallisuuden perustellen käsitystään sähköjohtimen elektronien pienellä vaellusnopeudella. Paikallisuus eli lokaalisuus on eräs klassisen hiukkasmallin ominaisuus, mikä tarkoittaa, että hiukkasella on tietty yksittäinen paikka. Lokaalisuuden vastakohta on laaja-alaisuus, klassisen aaltomallin perusominaisuus.

Timon elektronikäsititys oli kappalemäinen: hän mainitsi elektronien rata-ominaisuuden ja niiden etenemissuunnan muuttumisen esimerkiksi kaksoisraoissa. Tämä myös liitti elektroneihin aalto-ominaisuuden, de Broglien aineaallon, jonka kuitenkin muiden vastaustensa perusteella ymmärsi edelleen tieteellisen käsityksen vastaisesti. Loppukokeessa hän lisäksi perusteli elektronin massallisuudella myös sen varauksen.

### C. Fotonimallin kehitys

#### **Ensimmäinen haastattelu**

Timo hämmästeli millainen hiukkanen fotonin voisi olla. Hän kertoi fotonin kuvaavan säteilyn energian olemusta ja mainitsi sen olevan energiansiirron mekanismi. Timon hieman ristiriitaisten käsitysten mukaan valo koostuu fotoneista, mutta toisaalta hänen mukaansa fotonin kuvaava esimerkiksi vuorovaikutuksesta elektronin kanssa saatavaa tietoa. Lisäksi hän esitti, että vuorovaikutuksessa fotonin lakkaa olemasta.

#### **Toinen haastattelu**

Toisessa haastattelussa Timo määritteli fotonin lepomassattomaksi sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkasiksi, jonka massa voidaan laskea massan ja energian yhteyden avulla<sup>50</sup>. Hän sovelsi myös de Broglien hypoteeseja fotonille, vaikka varsinaisesti niitä sovelletaan massallisille olioille.

---

<sup>50</sup> Tieteellisen käsityksen mukaan fotonin on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen, ei sähkömagneettisen säteilyn.



Hän kertoi hyväksyttävästi, että fotonin energia on Planckin vakion ja taajuuden tulo. Fotonin liikemäärää tämä sen sijaan perusteli fotonin massallisuudella, mikä ei ole fysiikan näkökulmasta järkevää, koska fotonin liikemäärä on verrannollinen Planckin vakioon ja kääntäen verrannollinen säteilyn aallonpituuteen.

Timo kertoi, että fotoni saavuttaa valon nopeuden tyhjiössä juuri lepomassattomuutensa ansiosta, mutta väliaineessa sen nopeus muuttuu suhteelliseksi. Hänen käsitystään fotonien nopeuden muuttumisesta ”melkeinpä suhteelliseksi” on vaikea tulkita. Hän vaikutti ajattelevan, että valo koostuu valon nopeudella etenevistä fotoneista, joilla on samat ominaisuudet kuin valolla tai sähkömagneettisella säteilyllä. Fotonilla on hänen mukaansa esimerkiksi taajuus ja amplitudi, ja fotoni on poikittaista aaltoliikettä.

Timo perusteli fotonin avulla sähkömagneettisen säteilyn olemassaoloa ja havaittavuutta. Hänen mukaansa havaittaessa valoa havaitaan fotoneja, jolloin fotonilla on tietty paikka. Hänen näkemyksensä ovat ristiriitaisia; hän ilmeisesti ajatteli, että fotoneista voidaan tehdä suoria havaintoja, mutta toisaalta ei ollut varma fotonien todellisuudesta. Eräässä haastattelun vaiheessa Timo toi esille, että fotonit ovat olemassa vain hetkellisesti.

### **Kolmas haastattelu**

Kolmannessa haastattelussa Timo määritteli fotonin tieteellisen käsityksen mukaisesti sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkaseksi kertoen, että jokaisella vuorovaikutuksella on oma välittäjähiukkasensa. Hän myös esitti, että fotoni voi muuttaa muotoaan, koska sen energia muuntuu esimerkiksi valosähköisessä ilmiössä elektronin liike-energiaksi ja irrotustyöksi. Tieteellisen selityksen mukaan energian voidaan ajatella muuntuvan eri muotoihin, mutta tässä prosessissa fotoni lakkaa olemasta. Toisaalta hän mielsi fotonin edelleen eräänlaiseksi malliksi, jota käytetään tiettyjen ilmiöiden selittämiseen.

Nyt Timo liitti epäsuoran havaitsemisen myös fotoneihin. Lisäksi hänen dualismikäsityksensä oli kahtiajakautunut. Hän esitti sen merkitsevän, että valoallolla on hiukkasluonne, mutta toisaalla sanoi dualismin vaativan hiukkasluonteen olemassaoloa, koska aallon ja energian, tai aineen ja energian, vastaavuudelle täytyy löytyä selitys. Fysiikan näkökulmasta kumpikaan Timon tulkinnoista ei ole täysin oikea.

### **Loppuesti**

Loppukokeessa elektronia ja fonia käsittelevässä tehtävässä (ks. liite 4, tehtävä 4, s. 251). Timo mielsi fotonin malliksi jolla selitetään sähkömagneettisten ilmiöiden syntyä ja käyttäytymistä. Esimerkkejä tämä ei kuitenkaan maininnut. Hänen mukaansa fotonilla ei ole hiukkasluonnetta vaan aalto-ominaisuus, esimerkiksi näkyvä valo on tasoaalto, jossa sähkö- ja magneettikenttä värähtelevät samassa vaiheessa kohti suorasti

toisiinsa nähden. Timon mukaan levossa fotonin häviää kokonaan. Hän ei kuitenkaan perustellut käsitystään tarkemmin.

Timon fotonin liittyviä loppukokeen vastauksia on vaikea ymmärtää. Erityisesti se, ettei hän liittännyt hiukkasluonnetta fotonin on poikkeuksellista. Hänen esittämänsä aaltoluonteeseen liittyvä esimerkki viittasi hänen ajattelevan edelleen fotonien olevan valon rakenneosia. Fysiikan näkökulmasta on epärelevanttia tarkastella fotonia levossa. Fotonin voi kuitenkin ajatella häviävän absorptioprosessissa.

#### 5.4.4 Timon suhtautuminen kurssiin

Timon kurssiin suhtautumisen arviointi perustuu hänen palautekyselyn vastauksiinsa ja kommentteihinsa sekä viimeisen haastattelun vastauksiinsa.

##### A. Kurssin sisältö

Timo oli tyytyväinen kurssin työmäärään ja sisältöön. Hänen mukaansa kurssi tarjosi riittävästi haasteita oppimiselle ja selkeytti hänen tietämystään kurssilla käsitellyistä aiheista. Hän koki myös saaneensa valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita. Timon mielestä kurssi vastasi hyvin lukion opettajan tarpeita.

Timo myös arvosti kurssin aiheiden käsittelyn liikkeelle lähtemistä perusasioista ja aiheiden historiallisten taustojen selvittämistä. Hänen mukaansa mainitut tekijät ovat hyödyllisiä opettajan työn kannalta. Myös tiedemiesten erehdykset tai tieteen ”taka-askleet” olivat häntä kiinnostavia seikkoja.

Kurssin aiheista vaikeiksi Timo koki Schrödingerin aaltoyhtälön ratkaisemisen ja lämpökapasiteettien teorian yhteydessä vapausasteiden lukumäärän laskemisen. Vastaavasti valosähköinen ilmiö oli hänestä helppo, koska hän oli itse opettanut aihetta muutamia kertoja

##### B. Kurssin taso

Timo piti kurssia yleisesti ottaen melko vaativana. Erityisesti taustatehtävät olivat hänestä vaativia, mutta kotitehtävät eivät vaativia eivätkä helppoja. Kurssin lähiopetuksessa käytetyt luentotehtävät hän koki sopiviksi, jolloin ne pystyi ”mukavasti pätkäilemään kaverin kanssa”.

##### C. Opetusmenetelmät

Timo suhtautui kurssin opetusmenetelmiin myönteisesti. Kotitehtävät hän arvioi oman oppimisensa kannalta hyviksi ja tausta- ja luentotehtävät sekä luennot melko hyviksi.

Haastattelussa hän kertoi oppivansa parhaiten itse asioita pohdiskelemalla, ”konkretian kautta”. Ilmeisesti kurssin menetelmät olivat siten hänen oppimistyyliinsä sopivia.

#### D. Oma työpanos

Oman työpanoksensa arviointiin Timo suhtautui neutraalisti. Opettajan näkökulmasta arvioituna hän seurasi opetusta, mutta ei juurikaan osallistunut siihen kysymyksiin tai kommentteihin. Luentotehtävien tekemiseen pienryhmissä tämä sen sijaan osallistui aktiivisesti keskustellen.

Timo arveli, ettei paneutunut kotitehtäviin riittävästi, vaan vastasi niihin ajan puutteen vuoksi melko lyhyesti. Hän myös kertoi, että ei juuri perehtynyt kurssimateriaaleihin kotona lähiopetusjaksojen välillä. Hänen kotitehtävien vastauksensa olivat opettajan näkökulmasta melko suppeita ja suoraviivaisia, eivätkä ne sisältäneet mainittavasti omakohtaista pohdintaa. Se, ettei Timo panostanut kurssiin kävi ilmi myös haastatteluissa, joissa hän harvoin osasi kertoa tarkasteltavista aiheista niiden opetuksen jälkeen enemmän kuin ennen opetusta tehdyissä haastatteluissa. Mainittakoon kuitenkin, että Timon ennakkotiedot olivat verrattain hyvät. Hänen melko passiivinen opiskelutapansa saattoi kuitenkin vaikuttaa siihen, että hänen tieteellisten käsitysten kanssa ristiriidassa olevat käsityksensä pysyivät muuttumattomina kurssin ajan.

Kurssipalautteessa Timo arvioi tenttiin valmistautumisen sujuneen melko hyvin, mutta kertoi tentin jälkeen toteutetussa haastattelussa, että tenttiin valmistautuminen ei sujunut ajan puutteen vuoksi niin hyvin kuin hän olisi halunnut. Ilmeisesti loppudentti teki hänet tietoiseksi omissa tiedoissaan olevista puutteista.

### 5.5 Tapausopiskelija Lauri

Lauri oli fysiikan opettajaopintojensa puolivälissä, eikä ollut vielä suorittanut pedagogisia opintoja. Hänen esitestin menestyminensä oli ryhmän keskitasoa. Laurin haastattelut noudattivat samanlaista protokollaa kuin tapausopiskelija Aapon haastattelut (ks. s. 129-158), mutta hänen oppimisprosessinsa kuvataan tiivistetyssä muodossa.

#### 5.5.1 Peruskäsitteet ja -ilmiöt kurssin alussa

Lauri ymmärsi absorption tarkoittavan tapahtumaa, jossa ”jokin vastaanottaa jotakin, esimerkiksi fotonin eli energiaa”. Emissiossa vastaavasti jokin lähettää fotonin eli energiaa. Hänen absorption ja emission määritelmässään energia ja fotonit esiintyvät

synonyymisinä ja energia luonteeltaan jatkuvana tietyn energiamäärän asemasta. Kyseessä on ilmeisesti kielellinen huolimattomuus, sillä hän toi kuitenkin esille sähkömagneettisen säteilyn syntymisen atomin energiatilan muuttuessa. Hänen mukaansa tällöin korkeammalle energiatilalle virittynyt elektroni palaa matalammalle tasolle, jolloin atomista lähtee valokvantti eli fotoni. Laurin esittämä sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismi on valon synnyn selittämiseen usein käytettävä malli, joka ei ole yleispätevä kaikille säteilyn lajeille. Klassista säteilyn syntymekanismia hän ei tuonut haastattelussa esille.

Sironnan Lauri mielsi heijastumisen kaltaisena. Hänen mukaansa sironnassa aine ensin vastaanottaa esimerkiksi valokvantin energian, jonka jälkeen energia purkautuu ja siroaa pois. Tämän esittämä kvanttimalli sirontatapahtumalle on hyväksyttävä, mutta sironnan ymmärtäminen heijastumisen kaltaisena ei ole fysiikan näkökulmasta perusteltua. Sironta on väliaineessa tapahtuva ilmiö, eikä rajapintailmiö kuten heijastuminen.

Esitestissä Lauri kertoi klassisen hiukkasen ominaisuuksiksi tarkan paikan ja liikemäärän, jotka kvanttifysikaalisilla hiukkasilla voidaan tietää vain tietyllä todennäköisyydellä. Hänen määritelmänsä vaikutti opetuksessa omaksutulta mallivastaukselta, eikä hänen vastauksensa sisältänyt yhtään esimerkkiä eikä tehtävänannossa ollutta klassisen hiukkasen kuvailua.

### 5.5.2 Kvantti-ilmiöiden oppimisprosessi

#### A. Comptonin ilmiö

##### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Comptonin ilmiö oli Laurille vain hämärästi tuttu kurssin alkaessa. Hän muisteli, että siinä aine ottaa vastaan suurienergisien fotonien ja monta pienempienergistä emittoituu. Tieteellisen tulkinnan mukaan näin ei kuitenkaan ole, vaan Comptonin sironnan osapuolia ovat tuleva ja siroava fotoni ja vapaa elektroni. Laurin mielikuva emittoituvien fotonien energian pienuudesta verrattuna tulevan fotonin energian suuruuteen on silti ihan oikea.

##### **Toinen haastattelu**

Ennen Comptonin ilmiön opetusta suoritetussa toisessa haastattelussa Lauri arveli hänelle esitetyn Comptonin koejärjestelyn liittyvän sirontaan. Hänen mukaansa hiilen elektroniin osuva röntgensäteily saa sen kiihtyvään liikkeeseen, jolloin se lähettää sähkömagneettista säteilyä eri suuntiin. Selitystä säteilyä lähtemiselle eri suuntiin Lauri ei osannut antaa.

Laurin käyttämä selitysmalli oli klassisen Thomsonin sironnan malli eli hän ilmeisesti tunsi klassisen säteilyn syntymekanismiin, vaikkei ilmaissutkaan sitä ensimmäisessä haastattelussa. Thomsonin sironnassa säteilyn aallonpituus ei kuitenkaan muutu, kuten tapahtuu Comptonin sironnassa.

Comptonin tuloksista Lauri totesi, että eri aallonpituusella säteilyllä on erilainen energia, koska aallonpituus ja energia ovat kääntäen verrannolliset toisiinsa. Tämä ei täsmällisesti ottaen ole oikein, koska fotonin aallonpituus ja energia ovat kääntäen verrannollisia toisiinsa, ja säteilylle tämä ajatusmalli voisi toimia vain tarkasteltaessa säteilykentän ja materian välistä vuorovaikutusta.

### **Viides haastattelu**

Viidennessä haastattelussa Lauri kuvasi Comptonin sirontaa fotonin törmäyksenä elektroniin, jossa elektroni emittoi toisen, aallonpituudeltaan pienemmän fotonin joka lähtee eri suuntaan. Hän esitti ilmiön olevan osoitus fotonin liikemäärästä. Hänen mukaansa säteilyn taajuus pienenee ilmiössä, koska osa energiasta menee elektronille. Lauri toi esille myös klassisen sironnan tulkinnan, jonka mukaan siroava ja tuleva säteily ovat samanlaiset.

Tieteellisen mallin mukaan fotonin ja elektronin vuorovaikutuksen tarkastelu törmäyksenä on hyväksyttävää. Lauri ymmärsi hyväksyttävästi emittoituvan fotonin aallonpituuden suuruuden verrattuna tulevan fotonin aallonpituuteen ja tiesi ilmiön olevan osoitus fotonin liikemäärästä. Hän hallitsi myös sironnan klassisen mallin.

Laurin tietämys Comptonin ilmiöstä oli hyvää tasoa. Pienenä puutteena mainittakoon, ettei hän tuonut esille ilmiö tapahtumista röntgensäteilyllä. Hän näytti kuitenkin ymmärtävän sironnan kaksiosaiseksi prosessiksi, jossa tapahtuu fotonin absorptio ja emissio, kuten se kurssin opetuksessakin määriteltiin.

## **B. Valosähköinen ilmiö**

### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Lauri nimesi valosähköisen kokeen hänelle esitetyn laitteistoa esittävän kuvion perusteella ”kokeeksi, jossa fotonit irrottavat elektroneja valoherkästä materiaalista”. Hän kertoi elektronien irtoamisen tapahtuvan käytettävän säteilyn energia ollessa riittävän suuri, ja lisäsi, että säteilytettävän materiaalin tulee olla helposti ionisoituvaa, jolloin elektronit irtoavat heti saatuaan energiaa.

Huolimatta siitä, ettei Lauri osannut nimetä valosähköistä ilmiötä, hän hallitsi ilmiön perustasolla ymmärtäen ilmiön riippuvuuden käytettävän säteilyn energiasta, vaikkei maininnutkaan rajataajuuden käsitettä. Täsmällisesti ottaen säteilyn energian suuruus ilmenee vain materian välisessä vuorovaikutuksessa, mutta sanontatapa

”suurienerginen säteily” on vakiintunut fysiikan kieleen, joten sitä ei voida pitää kovin suurena virheenä.

Laurin käyttämä ajatusmalli ilmiössä käytettävän materiaalin ionisoituvuudesta on tässä yhteydessä virheellinen, koska ionisoituminen liittyy kaasumaisessa faasissa oleviin atomeihin. Ionisaatioenergia on energia, joka tarvitaan perustilassa olevan elektronin poistamiseksi atomista (ks. esimerkiksi Blatt 1992). Irrotustyö sen sijaan on metallin ominaisuus: energia, joka tarvitaan elektronin irrottamiseksi metallista sähkömagneettisen säteilyn avulla. Metallien irrotustyön arvot ovat karkeasti noin puolet ionisaatioenergioiden arvoista (ks. esimerkiksi Knight 2004). Käsitteet ovat analogisia (ks. esimerkiksi Atkins 1994), mutta eivät synonyymejä toistensa kanssa. Valosähköisessä ilmiössä kyse on siis ilmiöstä, jossa sähkömagneettinen säteily vuorovaikuttaa metallin kanssa ja saa aikaan elektronien irtoamisen metallin pinnasta.

### **Kolmas haastattelu**

Valosähköisen ilmiön opetuksen jälkeen suoritetussa kolmannessa haastattelussa Lauri luonnehti valosähköistä ilmiötä tapahtumaksi, jossa metallipintaan tulee aalto eli valokvantti. Tällä on tietty energia, jonka se luovuttaa elektronille. Hän toi esille myös klassisen mallin, jonka mukaan elektroni kerää energiaa, ”energiapuurosta” kunnes sitä on riittävästi. Laurin tulkinnan mukaan jotta elektroni ylittäisi laitteistossa olevan potentiaalieron, sen on kerättävä energiaa myös irronneena. Kvantittuminen tulee hänen mukaansa esiin ilmiössä siten, että tulevalle säteilyllä on tietty taajuus ja sen kautta myös tietty energia, jonka elektroni voi saada. Elektroni ottaa energian kerralla eikä vähitellen.

Lauri oli omaksunut valosähköisen ilmiön selitysmallin melko lailla opetuksen tavoitteiden mukaisesti. Kaikesta huolimatta hän ilmeisesti ajatteli säteilyn koostuvan tietyn energian omaavista valokvanteista, eikä liittänyt kvantittumista säteilyn ja materian väliseen vuorovaikutukseen, kuten fysiikan näkökulmasta olisi suositeltavaa.

Lauri hallitsi klassisen teorian mukaisen ennusteen valosähköiselle ilmiölle, mutta hänen ilmaisemansa kvanttitulkinna on kuitenkin puutteellinen, koska siitä puuttuvat muun muassa rajataajuuden ja irrotustyön käsitteet määritelmiseen.

### **C. Mustan kappaleen säteily**

#### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Ensimmäisessä haastattelussa Lauri ei osannut vastata mustan kappaleen säteilykuvaajia käsitteleviin kysymyksiin.

### **Toinen haastattelu**

Toisessa haastattelussa Lauri toi esille, että mustan kappaleen säteily on hänelle hieman epäselvä. Hän kertoi äärettömän pientä aallonpituutta vastaavan kvantin energian olevan hyvin suuri. Tietyissä lämpötilassa säteilyllä on todennäköisimmin joku tietty aallonpituus. Hän lisäsi, että lämpötilan kohotessa säteilykuvaaja siirtyy vasemmalle.

Lauri ajatteli mustan kappaleen säteilyn koostuvan kvanteista, eikä liittänyt kvantittumista vuorovaikutukseen materian ja säteilyn välillä. Kvantin energian ja aallonpituuden välisen riippuvuuden tämä ymmärsi hyväksyttävästi.

Laurin tulkintaa tietyissä lämpötilassa olevan säteilyn aallonpituuden todennäköisyystulkinnasta on vaikea ymmärtää. Ehkäpä hän viittasi Wienin siirtymälakiin, joka kertoo säteilykuvaajan maksimin tietyissä lämpötilassa. Tämän lämpötilan ja säteilykuvaajan ”paikan” eli säteilykuvaajan huipun välisen riippuvuuden Lauri kuvasi aivan oikein.

### **Kolmas haastattelu**

Kolmannessa haastattelussa Lauri hallitsi mustan kappaleen säteilyn aihealueen opetuksen tavoitteiden mukaisesti. Mustan kappaleen säteilyn merkitys oli kuitenkin jäänyt hänelle epäselväksi. Hän arveli, että mustan kappaleen spektriä mittaamalla voidaan tutkia sitä, millaista säteily on eri lämpötiloissa. Tieteen näkökulmasta tämä ei aivan pidä paikkaansa, vaan mittaamalla säteilyn spektri saadaan selville mustan kappaleen lämpötila.

Lauri käsitti, että ilmiössä energiansiirto on kvantittunutta Einsteinin kaavan,  $E$  on vakio kertaa taajuus, mukaisesti. Enää hän ei viittannut mielikuvaan säteilyn energian esiintymisestä kvantteina.

### **Loppuesti ja neljäs haastattelu**

Kurssin lopussa Lauri hallitsi mustan kappaleen säteilyn aiheen hyvin. Seisovan aaltoliikkeen periaate puuttui hänen loppuestin vastauksesta, mutta vastaavasti klassisen teorian mukainen ennusteen ja sen seurauksen ultraviolettikatastrofin hän oli maininnut. Loppuestin jälkeisessä haastattelussa hän kertoi myös seisovan aaltoliikkeen muodostumisesta tavoitteiden mukaisesti.

### **Viides haastattelu**

Viivästetyssä haastattelussa ilmeni, että Lauri on muodostanut Bosen ja Einsteinin jakaumasta, ideaalikaasumallista ja klassisesta säteilyn synnyn selitysmallista hybridimallin selittääkseen mustan kappaleen säteilyn syntymistä. Kokonaisuutena hänen mustan kappaleen säteilyn ymmärryksensä oli tyydyttävää tasolla.

### 5.5.3 Kvantti-olioiden oppimisprosessi

#### A. Elektronimallin kehitys

##### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Esitestissä Lauri määritteli elektronin negatiivisesti varautuneeksi alkeishiukkaseksi. Haastattelussa hän lisäsi elektronin kiertävän ydintä atomissa. Elektronin massa on hyvin pieni ytimen hiukkasiin verrattuna ja metallin vapaat elektronit toimivat sähkövirran aiheuttajina.

Huolimatta siitä, että hän määritteli elektronin alkeishiukkaseksi, hänen ilmaisuissaan elektroni esiintyi klassisen hiukkasen kaltaisena. Atomin rakennetta kuvaava planeettamalli ja sähkövirran malli elektronien liikkeenä ovat perustaltaan klassisia malleja.

##### **Toinen haastattelu**

Toisessa haastattelussa Laurin elektronimallista tuli esille uusia ominaisuuksia. Hän kertoi esimerkiksi, että elektronilla on aalto-ominaisuuksia eli aaltoluonne, joka voidaan havaita esimerkiksi kaksoisrakokokeissa. Hän lisäsi, että elektronilla on hiukkasluonne sen massan ja varauksen tähden. Hän liitti elektronin ominaisuudeksi myös fyysisen koon. Laurin käsitys elektronin aaltoluonteen havaitsemisesta on tieteellisen käsityksen mukainen. Fyysistä kokoa lukuun ottamatta hänen elektronimallinsa on virheetön, mutta ominaisuuksiltaan vaatimaton.

##### **Lopputesti**

Lopputestissä Lauri kertoi elektronin kvantittuneiksi ominaisuuksiksi lepomassan, varauksen ja spinin. Hän mainitsi, että elektronin kiertäessä atomissa se voi olla vain tietyillä tiloilla, joten tilat ovat kvantittuneet. Energian ja liikemäärän hän määritteli klassisilla kaavoilla ja viittasi suureiden muuttumiseen jatkuvasti elektronia kiihdytettäessä magneettikentällä.

Laurin esittämät elektronin kvantittuneet ominaisuudet ovat fysiikan näkökulmasta oikeita. Elektronin kiertoliikkeestä puhuminen sen sijaan kuuluu vain yksinkertaisimpiin atomimalleihin. Fysiikan näkökulmasta elektronia voidaan kiihdyttää sähkökentän, ei magneettikentän avulla. Tuolloin elektronien käyttäytymistä voidaan selittää klassisten teorioiden ja mallien avulla, eikä elektronin kvanttiluonnetta tarvitse huomioida.

##### **Viides haastattelu**

Viihdytetyssä haastattelussa Lauri kertoi, ettei elektroneja suora havaitseminen ole mahdollista niiden pienestä koosta johtuen. Havaittavissa on vain elektronien



vuorovaikutus ympäristönsä kanssa. Hänen mukaansa elektroneista saadaan tietoa esimerkiksi valosähköisen ilmiön koejärjestelyssä tai kaksoisrakokokeessa. Lisäksi elektronin energiatilan muuttuessa atomissa atomi emittoi säteilyä.

Laurin käsitys elektronin havaitsemisesta on tieteellisen käsityksen mukainen. Hänen käyttämänsä esimerkit kaksoisrakokoe ja valosähköinen ilmiö ovat asianmukaisia, mutta hän ei perustele vastauksiaan. Emissiospektrien tutkimisella ei varsinaisesti voida saada tietoa elektronista oliona, mutta ne liittyvät toki elektronin energiatiloihin.

Lauri perusteli elektronin kvanttiolioisuutta sen aalto- että hiukkasluonteella, atomin kiertoradoilla ja sijainnilla tietyillä energiatiloilla atomissa. Hänen perustelunsa elektronin kvanttiolioisuudelle oli oikea, mutta ei riittävä. Esimerkiksi paikkaan ja aikaan liittyviä ominaisuuksia, kuten yksilöitymättömyyttä tai hetkellistä ja paikallista eksistenssiä, hän ei maininnut elektronin yhteydessä. Kaikesta huolimatta vielä viidennessäkin haastattelussa Lauri yhdisti ratakäsitteen elektroniin.

## B. Fotonimallin kehitys

### **Esitesti ja ensimmäinen haastattelu**

Esitestissä Lauri määritteli fotonin sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkaseksi. Haastattelussa hän toi esille näkemyksen, jonka mukaan fotonit ovat sekä hiukkanen että aaltoliikettä. Tieteellisen käsityksen mukaan mikään olio ei voi olla samanaikaisesti hiukkanen ja aalto, mutta voi ilmentää käyttäytymisessään sekä hiukkas- että aaltomaisia piirteitä riippuen tarkasteltavasta ilmiöstä.

Lauri käytti valokvantin, sähkömagneettisen säteilyn ja energiapaketin käsitteitä fotonin synonyymeinä. Fysiikan näkökulmasta fotonin historiallisten käsitteiden käyttö on hyväksyttävää, kun ne ymmärretään saman käsitteen eri kehitysvaiheiksi. Luonnollisesti kutakin fotonikäsitettä on omana aikakautenaan käytetty hieman eri merkityksessä, mutta opetuksessa fotonin historiallisten käsitteiden merkitysten erottelu ei ole relevanttia ja johtaa luultavasti oppimisen ongelmiin.

Laurin mukaan sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkanen välittää tiedon jostakin asiasta johonkin toiseen paikkaan. Fysiikan näkökulmasta hänen käsityksensä ei ole oikea. Tieteellisen määritelmän mukaan fotonit ovat sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen, ei säteilyä. Samankaltainen käsitteellisen ymmärryksen ongelma esiintyi tapausopiskelija Aapolla.

### **Toinen haastattelu**

Toisen haastattelun perusteella Lauri käsitti fotonin olioksi, jolla on sekä hiukkas- että aaltoluonne. Fotonin paikka oli hänelle hieman epäselvä käsite. Hän päätteli, että ”jos havaitaan tietty fotonit tulevan jostain, esimerkiksi auringosta, niin silloin se on jostain

lähtenyt ja ollut jossain paikassa”. Hän ajatteli fotoneja havaittavan silloin kun havaitaan valoa. Hänen näkemyksensä mukaan valo koostuu fotoneista, joten hän ei liittänyt fotoneja säteilyn ja materian väliseen vuorovaikutukseen. Lauri epäili, että fotonin liikemäärästä johtuen fotonin paikkaan voidaan ehkä soveltaa epätarkkuusperiaatetta.

### **Kolmas haastattelu**

Valosähköisen ilmiön yhteydessä Lauri esitti säteilyn rakenneosamallin, jonka mukaan valo koostuu aalloista eli valokvanteista, joilla on tietty energia. Hänen näkemyksensä sisälsi myös naiivin dualismin eli ajatuksen, että valo on sekä aaltoja että hiukkasia.

### **Lopputesti**

Loppukokeen vastauksesta ilmeni, että Lauri on omaksunut fotonin kvantittuneet dynaamiset ominaisuudet, liikemäärän, liike-energian ja spinin. Hän myös ymmäsi fotonin syntymisen ja kuolemisen sekä aineen ja säteilyn välisen energianvaihdon kvantittuneisuuden. Spatio-temporaalisia ominaisuuksia, kuten yksilöitymättömyyttä tai hetkellistä ja paikallista eksistenssiä, tämä ei kuitenkaan maininnut.

### **Viides haastattelu**

Viivästetyssä haastattelussa Lauri kertoi fotoneja voitavan havaita esimerkiksi kaksoisrakokokeessa tai Comptonin sirontakokeessa. Fotoneja voidaan havaita kun havaitaan valoa. Hän kuitenkin lisäsi, että fotoneja ei voida havaita suoraan, vain niiden vuorovaikutus ympäristön kanssa.

Laurin mainitsemat kokeiden, kaksoisrakokokeen ja Comptonin sirontakokeen, havainnot toimivat osoituksena fotonin kvanttiluonteesta. Hän ei kuitenkaan kertonut vastauksessaan tarkemmin, miten fotonin kvanttiluonne kokeissa ilmenee. Hänen käsityksensä fotonien havaitsemisesta on nyt fysikaalisen näkemyksen mukainen.

Laurin mukaan fotoni on kvanttiolio, koska sillä on sekä aalto- että hiukkasluonne ja se ilmenee aiemmin mainituissa ilmiöissä. Hänen esittämänsä perustelut ovat hyväksyttäviä, mutta myös aikaan ja paikkaan liittyviä ominaisuuksia olisi voinut tuoda esille tässä yhteydessä.

## **5.5.4 Laurin suhtautuminen kurssiin**

### **A. Kurssin sisältö ja taso**

Lauri oli tyytyväinen kurssin ajalliseen etenemiseen. Hänestä ei tuntui siltä, että käsiteltävät asiat ehtii ymmärtää ennen seuraavaan aiheeseen siirtymistä. Aiheiden käsittelyvauhti ei myöskään tuntunut liian hitaalta.

- Ei ollu missään vaiheessa (...) sillä tavalla että ois (...) ahistanu että ei ymmärtäny ja sitte (-) ei myöskää (...) ollu silleen liian hitaasti (...) koska se oli semmosta (...) enemmänki keskustelutyypistä (...) sikäli ehkä ei tullu mitää semmosta.

Sisällöllisesti kurssi oli Laurin mielestä riittävän laaja ja samaa käsitystä tukevat myös hänen palautekyselyn vastauksensa. Työmäärältään kurssi oli hänelle muita kursseja helpompi. Hän koki saaneensa valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita.

Laurin mielestä tausta- ja luentotehtävät olivat vaativuustasoltaan vaihtelevia. Etenkin kurssin alussa taustatehtävät olivat vaativia, mutta helpottuivat kurssin loppua kohden. Kotitehtäviä hän piti melko helpoina. Haastattelussa kävi ilmi, että hän ymmärsi vaativuustason tarkoittavan matemaattista vaativuustaso: ”siinä mielessähän tää [kurssi] oli helppo, koska ei ollu mitää vaikeeta matematiikkaa”. Palautekyselyssä Lauri oli arvioinut kurssin melko helpoksi.

## B. Opetusmenetelmät

Lauri piti kurssin opiskelumenetelmistä ja koki niiden sopivan hänelle luento-opetukseen osallistumista paremmin ajattelua herättävänä, vaikka tämänkaltainen opiskelu olikin hänelle uusi kokemus.

- Kyllä se on sillä tavalla ihan, ei oo aikasemmin tuola tavalla nii oikeestaan opetettukaan (...) että ite miettii (-) tietenki se ei ehkä sovellu kovin isoile ryhmille tämmönen opetustyyli mutta (...) kyllä se niinku ajattelua herättää ja kyllä se miule ainaki omasta mielestä sopii.

Lauri koki kurssin annin opintoviikkomäärään nähden suureksi. Erityisesti käsitteiden merkitykset tulivat hänelle kurssin aikana selviksi. Lauri arveli asioiden jäävän paremmin mieleen niitä itse pohdiskellen.

- Jos ajatellaan, että tää on niinku kolme opintoviikkoa koko kurssi, niin kyllä tästä nyt varmaan enemmän jää mieleen kun tuota, jos ajattelee että (...) kun vuos sitten ois käyny jonkun kolmen opintoviikon kurssin, en tiiä että kuinka paljon siitä jäis mieleen sitten. (...) Jotku käsitteet ainakin niinku aika hyvin tuli selväks (...) nää setvittiin sillä tavalla aika juurta jaksain elikkä ei tosissaan vaan ollu joku ihminen kyllästyneenä luennoimassa (...) ehkä se jää paremmin mieleen kun sitä pitää vähän miettiä.

Lauri oli läsnä kaikilla kurssin luennoilla, mutta ei juuri tuonut esille omia näkemyksiään. Tausta- ja luentotehtävien tekemiseen hän osallistui aktiivisesti. Haastattelujen perusteella hän vaikutti olevan aidosti kiinnostunut kurssin aihepiiristä ja vaikutti pitävän ilmiöiden ja käsitteiden merkitysten pohtimisesta sekä luennoilla että

haastatteluissa. Hänen oppimistyyliinsä vaikutti syväsuuntautuneelta, ymmärtämiseen tähtäävältä.

Laurin ennakkotietämys kurssin aiheista oli melko hyvää tasoa ottaen huomioon, että hän oli vasta opintojensa puolivälissä. Haastattelussa Lauri kertoi, että tarkasteltaviin aiheisiin liittyvä tieto on peräisin lukiosta ja aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta. Aiemmin opitun tiedon mieleen palauttaminen oli hänelle kohtalaisen vaivatonta. Laurin metakognitiiviset taidot vaikuttivat melko kehittyneiltä, koska hän pystyi arvioimaan omaa oppimisprosessiaan.

## 5.6 Kvantti-ilmiöiden oppimisprosessien koonti

Tässä luvussa tarkastellaan kokoavasti tapausopettajien ja -opiskelijoiden peruskäsitteiden ja -ilmiöiden hallintaa kurssin alussa sekä Comptonin ilmiön, mustan kappaleen säteilyn ja valosähköisen ilmiön oppimisprosesseja kurssin aikana fysikaalisten mallien, lakien ja periaatteiden näkökulmasta.

### 5.6.1 Peruskäsitteet ja -ilmiöt kurssin alussa

Kuten luvussa 5.1. (s. 91) määriteltiin, klassisesti absorptio on prosessi, jossa säteilykentän energia muuntuu aineen vapausasteiden energiaksi. Emissio puolestaan on absorptiolle käänteinen prosessi, jossa vapausasteiden energia muuntuu säteilykentän energiaksi. Atomisysteemejä tarkasteltaessa absorptio on tapahtuma, jossa fotonin energia siirtää elektronin korkeammalle energiatilalle, ja emissio puolestaan on tapahtuma, jossa elektroni siirtyy matalammalle energiatilalle, jolloin energiaero emittoituu fotonina<sup>51</sup>. Absorptio ja emissio voidaan ajatella lukuisista tapahtumista muodostuviksi prosesseiksi.

Sironta ymmärretään klassisesti prosessiksi, jossa sähkömagneettisen säteilyn tai hiukkasten etenemissuunta muuttuu. Hiukkasfysiikassa sironta määritellään tapahtumaksi, jonka alkutilassa hiukkasia on kaksi; lopputilassa niitä on kaksi tai useampia. Kvanttifysiikassa fotonin ja elektronin välinen sironta voidaan ymmärtää tapahtumaksi, jossa fotonin absorboituu ja välittömästi emittoituu. Hiukkasfysiikan kielellä fotonin ja elektronin sironta on siten tapahtuma, jonka alkutilassa on fotonin 1 ja elektroni, ja lopputilassa fotonin 2 ja elektroni. Tähän selitysmalliin viitataan tässä työssä sironnan kvanttimalilla.

Klassisen mallin mukaan sähkömagneettista säteilyä synnyttävät kiihtyvässä liikkeessä olevat varatut hiukkaset. Kvanttimallissa säteilyn syntyminen selitetään atomin elektronin viritystilan purkautumisena eli elektronin siirtymisenä alemmalle

---

<sup>51</sup> Yleisesti absorptiossa ja emissiossa säteilykentän tila muuttuu kvantittuneesti.

energiatilalle. Sähkömagneettisen säteilyn klassinen ja kvanttimalli ovat samamerkityksisiä emission mallin kanssa.

Kurssin alussa tapausopettaja Tuomas selitti kaikki peruskäsitteet sekä klassisen mallin että kvanttimallin avulla ymmärtäen mallit erillisiksi. Hänen ymmärryksensä vaikutti melko ongelmattomalta ja ristiriidattomalta (taulukko 5.14, s. 178).

Tapausopettaja Timon absorptio- ja emission mallit olivat klassisten ja kvanttimallien piirteiden yhdistelmiä eli niin sanottuja hybridimalleja<sup>52</sup> (taulukko 5.14, s. 178). Esimerkiksi energianvaihto esiintyi hänen puheessaan luonteeltaan jatkuvana, vaikka hän toisaalta esitti, että emissiossa emittoituu energiakvantti. Sironnan määrittelyyn Timo sovelsi klassista mallia. Hän ei tuonut esille klassista säteilyn syntymekanismia, mutta vastaustensa perusteella tunsii säteilyn synnyn kvanttimallin.

Tapausopiskelija Aapo esitti absorptiolle ja emissiolle vain klassiset mallit ja mainitsi virheellisesti aallonpituuden muuttuvan emissiossa. Sironnan käsitteen hän sekoitti dispersion käsitteeseen. Sähkömagneettisen säteilyn synnylle Aapo esitti kvanttimallin, mutta ei tuonut esille klassista säteilyn syntymallia esitestissä tai ensimmäisessä haastattelussa. Hänelle sähkömagneettisen säteilyn ja (säteily)energian käsitteet olivat samamerkityksisiä. Kyseessä voi olla käsitteiden eriytymättömyys tai sähkömagneettisen säteilyn synnyn klassisen ja kvanttimallin sovellusalueiden ymmärtämisen ongelmat.

Tapausopiskelija Laurin absorptio- ja emission määritelmässä energia ja fotoni esiintyvät synonyymisinä sekä energia luonteeltaan jatkuvana tietyn energiamäärän asemasta. Hän kuitenkin hallitsi sähkömagneettisen säteilyn synnyn kvanttimallin. Klassista säteilyn syntymekanismia hän sen sijaan ei tuonut esitestissä tai haastattelussa esille. Huolimatta siitä, että Lauri mielsi sironnan heijastumisen kaltaiseksi hän hallitsi sironnan kvanttimallin.

---

<sup>52</sup> Hybridimalleja muodostuu, kun oppija ei ymmärrä mallia piirteineen erillisiksi.

**Taulukko 5.14.** Tapausopettajien ja -opiskelijoiden peruskäsitteiden mallien luokittelu kurssin alussa.

KÄSITE TAI ILMIÖ	Tapaus			
	Tuomas	Timo	Aapo	Lauri
Absorptio ja emissio	Klassinen ja kvantti	Hybridi	Klassinen	Hybridi
Sironna	Klassinen	Klassinen	Virhe-käsitys	Kvantti
Sähkömagneettisen säteilyn syntymekanismi	Klassinen ja kvantti	Kvantti	Kvantti	Kvantti

Tapausopiskelijoiden peruskäsitteiden analyysin perusteella tapausopettaja Tuomaan lähtökohdat olivat kurssin alussa parhaimmat, koska hän hallitsi absorption, emission ja sähkömagneettisen säteilyn synnyn klassiset sekä kvanttimallit ja sironnan kvanttimallin. Myös tapausopiskelija Laurin peruslähtökohdat olivat hyvät. Hän hallitsi sironnan ja sähkömagneettisen säteilyn synnyn kvanttimallit sekä absorption ja emission hybridimallit.

Tapausopettaja Timo esitti sähkömagneettisen säteilyn synnylle kvanttimallin, absorptiolle ja emissiolle hybridimallin ja sironnalle klassisen mallin. Heikoimmat lähtökohdat oli peruskäsitteiden hallinnan näkökulmasta Aapolla, joka esitti sähkömagneettisen säteilyn synnylle kvanttimallin, absorptiolle ja emissiolle klassisen mallin. Sironnasta hän toi kuitenkin esille tieteellisen käsityksen vastaisen käsityksen.

Timon ja Laurin absorption käsitykset vaikuttivat hieman jäsentymättömältä ja vaativat uudelleenorganisointia, jotta niiden varaan voidaan menestyksekkäästi rakentaa uutta tietoa. Myös Aapon olisi korvattava virheellinen sironnan käsitys tieteellisesti hyväksyttävällä käsityksellä, jotta hän voisi omaksua kurssilla käsiteltävän Comptonin ilmiön menestyksekkäästi. Peruskäsitteiden kertaaminen kurssin alussa olisi hyödyllistä kaikille kolmelle.

### 5.6.2 Comptonin ilmiö

Kurssin alussa tapausopettaja Tuomas käytti ilmiön tulkintaan fotonin ja elektronin klassisen mekaniikan kimmoisan törmäyksen mallia, jossa energia ja liikemäärä säilyvät (taulukko 5.15, s. 180). Hän oletti törmäävän ja sironneen fotonin olevan sama, kuten sen matemaattisessa tarkastelussa oletetaan, sen sijaan että olisi kertonut sironnassa tapahtuvan fotonin absorption ja välittömän emission. Opetuksen jälkeen toteutetussa haastattelussa Tuomas sen sijaan tulkitsi ilmiön fotonin ja elektronin väliseksi tapahtumaksi, jossa tuleva fotoni absorboituu ja sironnut fotoni emittoituu, ja sovelsi

kimmoisan törmäyksen mallia vain selittäessään Comptonin sirontakaavan johtamista. Lisäksi hän ymmärsi energian kvantittumisen vuorovaikutuksessa säteilykentän ja materian välisessä vuorovaikutuksessa.

Tapausopettaja Timo kutsui kurssin alussa Comptonin ilmiötä röntgensäteilyn sironnaksi ja selitti ilmiön röntgenfotonin törmäyksenä vapaaseen elektroniin nojaten energian säilymisen periaatteeseen. Hän ei kuitenkaan viitannut lainkaan liikemäärän säilymiseen tai fotonin liikemäärään (taulukko 5.15, s. 180). Fotonin ja elektronin vuorovaikutukselle tämä sovelsi epäsuorasti kimmoisan törmäyksen mallia. Hän esitti samat mallit myös kurssin lopussa. Lisäksi hän sanoi Comptonin ilmiön osoittavan energian ja massan välisen yhteyden ja todistavan säteilyn ja massan vastaavuuden liikemäärän avulla. Liikemäärän säilymisen periaate on voimassa Comptonin ilmiössä, mutta säteilyn ja massan vastaavuus on Timon itse kehittämä dualismi-periaate.

Tapausopiskelija Aapo sekoitti Comptonin ilmiön valosähköiseen ilmiöön kurssin alussa. Viivästetyssä haastattelussa hän ei osannut kertoa, mitä Comptonin ilmiöllä tarkoitetaan.

Tapausopiskelija Lauri muisteli kurssin alussa, että Comptonin ilmiössä aine ottaa vastaan suurienergiaisen fotonin ja emittoi monta energialtaan pienempää (taulukko 5.15, s. 180). Hänen soveltamansa malli oli hybridimalli, jossa yhdistyivät klassiset absorption ja emission mallit (aine vastaanottaa/luovuttaa) ja kvanttimallit (vastaanottaa/luovuttaa fotonin). Lisäksi käsitys oli virheellinen, koska Comptonin ilmiön osapuolet ovat tuleva ja siroava fotonit sekä elektroni. Lauri kuitenkin ymmärsi energian säilymisen sirontatapahtumassa.

Viivästetyssä haastattelussa Lauri kuvasi Comptonin sirontaa fotonin törmäyksenä elektroniin, jossa elektroni emittoi toisen, aallonpituudeltaan pienemmän fotonin, joka lähtee eri suuntaan. Hän kertoi, että ilmiö on osoitus fotonin liikemäärästä. Hänen mukaansa säteilyn taajuus pienenee ilmiössä, koska osa energiasta menee elektronille. Hän vaikutti ymmärtävän sironnan kaksiosaiseksi prosessiksi, jossa fotonit absorboituu ja emittoituu eli hän sovelsi sironnan kvanttimallia. Epäsuorasti esille tulivat energian ja liikemäärän säilymisen periaatteet.

**Taulukko 5.15.** Tapausopettajien ja –opiskelijoiden mallit, lait ja periaatteet Comptonin ilmiön yhteydessä. Esi = ennen opetusta, jälki = opetuksen jälkeen, viiv = viivästetyssä haastattelussa, ESP = energian säilymisen periaate, LSP = liikemäärän säilymisen periaate.

TAPAUS	Mallit, lait ja periaatteet
Tuomas	<b>Esi:</b> fotonin ja elektronin kimmoisa törmäys + ESP ja LSP <b>Jälki:</b> fotonin absorptio ja emissio + kimmoisan törmäyksen malli matemaattisessa tarkastelussa + ESP ja LSP
Timo	<b>Esi:</b> fotonin ja vapaan elektronin (kimmoisa) törmäys + ESP <b>Jälki:</b> fotonin ja vapaan elektronin (kimmoisa) törmäys + ESP + LSP + oma dualismi-periaate
Aapo	<b>Esi:</b> sm-säteily irrottaa elektroneja aineesta <b>Viiv:</b> ei muistikuvaa
Lauri	<b>Esi:</b> suurienergiainen fotoni absorboituu aineeseen ja monta pienienergiasta emittoituu <b>Viiv:</b> fotonin absorptio ja emissio + ESP ja LSP (implisiittisesti)

### 5.6.3 Valosähköinen ilmiö

Tapausopettaja Tuomas tulkitsi valosähköisen ilmiön fotonin törmäykseksi metallin pintaan, jossa fotoni absorboituu (taulukko 5.16, s. 181). Ajatusmalli fotonin törmäyksestä metalliin kertoo valon rakenneosamallista, jossa valon ajatellaan koostuvan fotoneista<sup>53</sup>. Hänen mukaansa fotonien energia on taajuusriippuva siten, että  $E = hf$ . Jos fotonin energia on riittävän suuri, kuluu se elektronin irrotustyöhön ja energian liike-energiaksi. Tuomaan vastauksesta käy ilmi, että hän nojaa energian säilymisen periaatteeseen.

Tapausopettaja Timo määritteli kurssin alussa valosähköisen ilmiön ilmiöksi, jossa suurienerginen säteily irrottaa vapaita elektroneja metallista (taulukko 5.16 s. 181). Hänen mukaansa säteilyn energia siirtyy elektronin irrotustyöksi ja liike-energiaksi. Timo ei käyttänyt lainkaan fotonin käsitettä. Hän vaikutti ajattelevan, että säteilyn energia on paketoitunut. Timo esitti Einsteinin valosähköisen ilmiön yhtälön fysikaalisesti oikeassa muodossa mutta kertoi ilmiön todistavan fotonin energian eli olevan osoitus dualismista. Hänen erikoinen, jo Comptonin ilmiön yhteydessä esiin tullut dualismi-käsityksensä – massan ja aallon/energian vastaavuus – huomioiden näkemyksensä ei ole hyväksyttävä. Dualismi-käsitys ei poistunut kurssin aikana vaan Timo toi sen esille myös lopputestissä ja neljännessä haastattelussa. Ilmeisesti dualismi-käsityksen taustalla on käsitys fotonin liikemassallisuudesta. Tämä oli hänen

<sup>53</sup> Rakenneosamallin mukaan fotonit lisäksi etenevät suoraviivaisesti.



päätelynsä pohjana, kun hän kurssin lopussa sovelsi energian säilymisen periaatetta fotonin ja elektronin törmäykselle.

**Taulukko 5.16.** Tapausopettajien ja –opiskelijoiden mallit, lait ja periaatteet valosähköisen ilmiön yhteydessä. Esi = ennen opetusta, jälki = opetuksen jälkeen, ESP = energian säilymisen periaate, LSP = liikemäärän säilymisen periaate.

TAPAUS	Mallit, lait ja periaatteet
Tuomas	<p><b>Esi:</b> fotonin törmäys metalliin ja absorptio, elektronin irtoaminen + valosähköinen yhtälö kvalitatiivisesti ESP:hen nojaten + fotonin energia <math>E = hf</math> + irrotustyö + rajataajuus</p> <p><b>Jälki:</b> valo absorboituu metalliin fotoneina, elektronien irtoaminen + valosähköinen yhtälö kvalitatiivisesti + elektronien maksimienergia ei riipu valon intensiteetistä</p>
Timo	<p><b>Esi:</b> säteilyn energia irrottaa elektroneja + valosähköinen yhtälö, oma dualismi-periaate + ESP + rakenneosamalli + irrotustyö</p> <p><b>Jälki:</b> fotonin ja elektronin törmäys + ESP + rajataajuus + irrotustyö</p>
Aapo	<p><b>Esi:</b> UV-valo / energia / fotonit irrottavat elektroneja + elektronin liike-energia sähkökentässä <math>\frac{1}{2}mv^2 = eU</math>, elektronien irtoamisnopeus on verrannollinen valon intensiteettiin elektronien irrotessa</p> <p><b>Jälki:</b> fotoni irrottaa elektronin metallin pinnasta + irtoavien elektronien määrää verrannollinen valon intensiteettiin rajataajuuden ylittyessä + irrotustyö</p>
Lauri	<p><b>Esi:</b> fotonit irrottavat elektroneja valoherkästä materiaasta + energiariippuvuus</p> <p><b>Jälki:</b> metallin pintaan tuleva fotoni luovuttaa kaiken energiansa elektronille, joka irtoaa + valon rakenneosamalli</p>

Kuten taulukko 5.16 osoittaa, tapausopiskelija Aapon käsitys valosähköisestä ilmiöstä kurssin alkaessa oli jäsentymätön ja tiedollisesti vaatimaton mallien, lakien ja periaatteiden näkökulmasta. Ainoa hänen käyttämänsä yhtälö kuvaa elektronin liike-energiaa sähkökentässä. Aapo kertoi, että elektronien irrotessa säteilyn intensiteetti lisää elektronien irtoamisnopeutta. Haastattelussa ei kuitenkaan käynyt ilmi, ymmärsikö hän

elektronien irtoamisnopeuden irtoavien elektronien määräksi eli elektronivirraksi, jolloin hänen käsityksensä oli tieteellisen käsityksen mukainen, vai elektronien saamiksi nopeuksiksi niiden irrotessa, jolloin se oli tieteellisen käsityksen vastainen. Aapo kuitenkin ymmärsi säteilyn intensiteetin vaikutuksen valosähköisessä ilmiössä ja hallitsi tulkinnan, jonka mukaan yksi kvantti irrottaa yhden elektronin.

Tapausopiskelija Lauri esitti kurssin alussa, että valosähköisessä ilmiössä fotonit irrottavat elektroneja valoherkästä materiaalista (taulukko 5.16, s. 181). Tämän syvempää selitystä ilmiölle hän ei pystynyt esittämään. Ilmiön opetuksen jälkeen Lauri ymmärsi, että ilmiössä yksittäinen fotoni luovuttaa kaiken energiansa yksittäiselle elektronille. Hän kuitenkin toi esille historiallisen valon rakenneosamallin, jossa valo koostuu tietyn energian omaavista valokvanteista eli fotoneista.

#### 5.6.4 Mustan kappaleen säteily

##### **Tuomas ja Timo**

Kurssin alussa tapausopettaja Tuomas määritteli mustan kappaleen valoa heijastamattomaksi kappaleeksi. Mustan kappaleen säteilyn hän kertoi olevan lähtöisin kappaleesta itsestään (taulukko 5.17, s. 183). Hän esitti Planckin kvanttihypoteesin, jonka mukaan mustan kappaleen säteily syntyy energia-annoksina. Hänen mustan kappaleen säteilyn hallintansa oli melko vaatimatonta tasoa.

Opetuksen jälkeen toisessa haastattelussa Tuomas kertoi lämpötasapainon muodostumisesta mustan kappaleen ontelomallin sisälle ja mustan kappaleen säteilyn intensiteetin lämpötilariippuvuudesta. Hän viittasi jälleen Planckin kvanttipostulaattiin ja kertoi, että dipoliväriähtelijät emittoivat sähkömagneettista säteilyä vain tietyillä taajuuksilla eli vain tietyn suuruisina energia-annoksina. Energia siis on kvantittunut.

Tuomaan lopputestissä esille tuoma tieto mustan kappaleen säteilystä oli laajempi kuin hänen toisessa haastattelussa esille tuoma tietonsa (taulukko 5.17, s. 183). Hän kertoi lämpötasapainon muodostumisesta ontelomallin sisälle perustellessaan mustan kappaleen ideaalisuutta, mutta ei kuitenkaan maininnut seisovan aaltoliikkeen muodostumista mustan kappaleen sisälle eikä dipoliväriähtelijämallia. Tuomas viittasi mustan kappaleen säteilyn yhteydessä Einsteinin valosähköisen ilmiön tulkintaan kvanttihypoteesin avulla.

**Taulukko 5.17:** Tapausopettajien mallit, lait ja periaatteet mustan kappaleen säteilyn yhteydessä. Esi = ennen opetusta, jälki I = opetuksen jälkeen, jälki II = lopputestissä, ESP = energian säilymisen periaate, LSP = liikemäärän säilymisen periaate.

TAPAUS	Mallit, lait ja periaatteet
Tuomas	<p><b>Esi:</b> musta kappale on heijastamaton + mustan kappaleen säteily on peräisin siitä itsestään + kvanttihypoteesi</p> <p><b>Jälki I:</b> lämpötasapaino = MK:n emittoima ja absorboima energia yhtäsuuret + MKS:n intensiteetti on verrannollinen lämpötilaan + kvanttihypoteesi + dipolivärähtelijämalli</p> <p><b>Jälki II:</b> MK on ideaalinen absorboija ja emittoija + lämpötasapaino + mustan kappaleen säteily on peräisin siitä itsestään + ontelomalli + kvanttihypoteesi + Einsteinin selitys valosähköiselle ilmiölle + fotonin energia <math>E = hf</math></p>
Timo	<p><b>Esi:</b> kaikilla taajuuksilla yhtä voimakkaasti säteilevä ideaalisäteilijä</p> <p><b>Jälki I:</b> musta kappale säteilee ideaalisesti kaikilla aallonpituuksilla yhtä voimakkaasti</p> <p><b>Jälki II:</b> musta kappale on ideaalinen säteilijä, joka absorboi ja emittoi kaikilla aallonpituuksilla yhtä suurella intensiteetillä + Wienin lain tulkinta: lämpötilan ja aallonpituuden maksimin tulo on vakio, <math>b = \lambda_{\max} T</math></p>

Kuten taulukosta 5.17 nähdään, tapausopettaja Timo määritteli kurssin alussa mustan kappaleen kaikilla taajuuksilla yhtä voimakkaasti säteileväksi ideaalisäteilijäksi. Timon virheellistä käsitystä selvitettiin tarkemmin luvussa 5.4.2 (s. 159). Muuta Timo ei juurikaan osannut mustan kappaleen säteilystä kertoa. Opetuksen jälkeen toteutetussa haastattelussa hän kertoi vain, että täydellistä mustaa kappaletta ei ole olemassa, mutta aurinko on aika lähellä sitä. Lopputestissä Timo määritteli mustan kappaleen ideaalisäteilijäksi, joka absorboi ja emittoi kaikilla taajuusalueilla yhtä suurella intensiteetillä. Hänen vastauksestaan puuttui ontelosäteilijän malli ja selitys seisovan aaltoliikkeen syntyisestä mustan kappaleen mallina käytetyn onkalon sisälle. Timo tulkitsi vastauksessaan Wienin lakia siten, että säteilyn aallonpituuden maksimin ja lämpötilan tulo on vakio.

## **Aapo ja Lauri**

Tapausopiskelija Aapolle mustan kappaleen säteilyn tuntemus oli heikkoa kurssin alussa. Opetuksen jälkeen kurssin lopussa hän esitti, että ilmiössä fotonin energia muuntuu mustan kappaleen rakenneosien liike-energiaksi (taulukko 5.18, s. 185). Aapo siis muodosti hybridimallin kvanttimallista ja klassisesta aineen rakenneosamallista. Loppu-*testissä* hän viittasi seisovan aaltoliikkeen muodostumiseen mustan kappaleen sisälle, muttei perustellut käsitystään tarkemmin. Musta kappale on täydellinen absorboija, kuten Aapo sanoikin, mutta myös täydellinen emittoija. Emissiota Aapo ei maininnut loppukokeen ja haastattelun vastauksissaan.

Viivästetyssä haastattelussa Aapo vaikutti ymmärtävän mustan kappaleen käsitteen melko hyvin. Selittäessään mustassa kappaleessa tapahtuvaa absorptiota ja emissiota Aapo kertoi sekä rakenneosien värähtelyn lisääntymistä että elektronien virittymisestä korkeammille energiailoille eli sovelsi vastauksessaan hybridimallia. Hän kuitenkin ymmärsi, ettei energianvaihto ole jatkuvaa vaan kvantittunutta.

Tapausopiskelija Lauri ei osannut lainkaan vastata mustan kappaleen säteilyä käsitteleviin kysymyksiin kurssin alussa (taulukko 5.18, s. 185). Opetuksen jälkeen toisessa haastattelussa hän toi esille säteilyn rakenneosamallin mustan kappaleen säteilystä kertoessaan. Lauri viittasi epäsuorasti Wienin siirtymälakiin, joka kertoo säteilykuvaajan maksimin tietyssä lämpötilassa. Tämän lämpötilan ja säteilykuvaajan ”paikan” eli säteilykuvaajan huipun välisen riippuvuuden hän selitti hyväksyttävällä tavalla. Opetuksen jälkeen Lauri hallitsi mustan kappaleen säteilyn aihealueen jokseenkin opetuksen tavoitteiden mukaisesti. Hän käsitti, että ilmiössä energiansiirto on kvantittunutta Einsteinin kaavan mukaisesti. Enää hän ei viittannut säteilyn energian esiintymiseen kvantteina.

Loppu-*testissä* Lauri hallitsi mustan kappaleen säteilyn aiheen hyvin. Seisovan aaltoliikkeen periaate puuttui hänen loppu-*testin* vastauksestaan, mutta vastaavasti hän mainitsi klassisen teorian mukainen ennusteen ja sen seurauksen ultraviolettikatastrofin. Loppu-*testin* jälkeisessä haastattelussa Lauri hallitsi myös seisovan aaltoliikkeen muodostumisen ja Wienin lain tulkinnan opetuksen tavoitteiden mukaisesti. Viivästetyssä haastattelussa kuitenkin ilmeni, että hän oli muodostanut mustan kappaleen säteilyn synnylle hybridimallin, jossa on piirteitä klassisesta säteilyn synnyn mallista ja klassisesta aineen rakenneosamallista.

**Taulukko 5.18.** Tapausopiskelijoiden mallit, lait ja periaatteet mustan kappaleen säteilyn yhteydessä. Esi = ennen opetusta, jälki I = opetuksen jälkeen, jälki II = lopputestissä, viiv = viivästetyssä haastattelussa, ESP = energian säilymisen periaate, LSP = liikemäärän säilymisen periaate.

TAPAUS	Mallit, lait ja periaatteet
Aapo	<p><b>Esi:</b> -</p> <p><b>Jälki I:</b> säteilyn rakenneosamalli + kvanttihypoteesi (epäsuorasti)</p> <p><b>Jälki II:</b> MK on täydellinen absorboija + fotonin energia muuntuu MK:n rakenneosien liike-energiaksi (hybridimalli) + seisovan aaltoliikkeen periaate (maininnan tasolla)</p> <p><b>Viiv:</b> MK absorboi ja emittoi kaiken siihen tulevan säteilyn, kaikki aallonpituudet + mustaa kappaletta lämmitettäessä elektronit siirtyvät korkeammille viritystiloille eli niiden värähtely lisääntyy (hybridi) + energia voi varastoitua vain tietyille tiloille / MK voi luovuttaa energiaa vain tietyille tiloille (energianvaihto on kvantittunutta)</p>
Lauri	<p><b>Esi:</b> -</p> <p><b>Jälki I:</b> säteilyn rakenneosamalli + Wienin siirtymälaki (kvalitatiivisesti ja implisiittisesti)</p> <p><b>Jälki II:</b> energiansiirto on kvantittunutta <math>E = \text{vakio} \cdot f</math></p> <p><b>Jälki II:</b> MK on ideaalinen absorboija + onkalomalli + seisovan aallon periaate + Wienin siirtymälaki (kvalitatiivisesti ja implisiittisesti) + tasanjakautumisen periaate + vapausasteiden kynnysenergiat + energiansiirto on kvantittunutta <math>E = \text{vakio} \cdot f</math></p> <p><b>Viiv:</b> mustan kappaleen säteily on peräisin siitä itsestään + onkalomalli + MKS:n synnyn hybridimalli (lämpöliikkeessä olevat värähtelijät + kiihtyvät varaukset + nopeat lähettävä korkeataajuisia ja hitaat matalataajuisia säteilyä) + Wienin siirtymälaki (kvalitatiivisesti ja implisiittisesti)</p>

### 5.6.5 Ilmiöiden mallien muuttuminen

Tapausopettajien ja -opiskelijoiden peruskäsitteiden ja kvantti-ilmiöiden mallien ja periaatteiden koonti on esitetty taulukossa 5.19 (s. 187). Kuten taulukosta havaitaan, erinomaisesti sekä klassisten ja kvanttimallien avulla peruskäsitteet määritellyt tapausopettaja Tuomas esitti kvanttimallin jokaiselle kvantti-ilmiölle kurssin lopussa. Hänen selityksissä esiintyivät usein myös oleelliset periaatteet.

Tapausopettaja Timo esitti kurssin alussa jäsentymättömästä ymmärryksestä kertovat hybridimallit absorptiolle ja emissiolle, klassisen mallin sironnalle ja kvanttimallin sähkömagneettisen säteilyn synnylle (taulukko 5.19, s. 187). Hänen esittämänsä mallit Comptonin ilmiölle ja valosähköilmiölle olivat kurssin lopussa luonteeltaan klassisia, ja mustan kappaleen säteilyä hän ei osannut selittää. Periaatteita hän liitti ilmiöihin tyydyttävästi, vaikkakin esitti tieteellisen käsityksen vastaisen dualismi-periaatteensa sekä Comptonin ilmiössä että valosähköilmiön yhteydessä. Voi olla, että hänen omituinen dualismi-käsityksensä vaikeutti mustan kappaleen ilmiön oppimistään.

Tapausopiskelija Laurin lähtötilanne oli melko samankaltainen kuin tapausopettaja Timon (taulukko 5.19, s. 187). Periaatteita ei Lauri kurssin alussa ilmiöihin liittänyt lainkaan. Voidaan kuitenkin todeta, että Laurin oppiminen oli hieman Timoa menestyksekkäämpää. Hän esitti viivästetyssä haastattelussa Comptonin ilmiölle kvanttimallin ja valosähköiselle ilmiölle klassisen mallin. Laurin mustan kappaleen säteilylle esittämä malli oli aiheen opetuksen jälkeen kvanttimalli, mutta kurssin lopussa ja viivästetyssä haastattelussa hybridimalli.

Tapausopiskelija Aapon peruskäsitteiden mallit olivat kurssin alussa puhtaasti joko klassisia tai kvanttimalleja lukuun ottamatta sirontaa, jolle hän esitti tieteellisen käsityksen vastaisen mallin (taulukko 5.19, s. 187). Periaatteita Aapo ei liittänyt lainkaan ilmiöiden selityksiin. Kvantti-ilmiöiden oppiminen ei ollut kovin menestyksekkästä, sillä Comptonin ilmiö oli hänelle täysin vieras viivästetyssä haastattelussa, eikä klassinen valosähköisen ilmiön malli muuttunut kurssin aikana. Lisäksi Aapon mustan kappaleen säteilyn malli jäi jäsentymättömäksi hybridimalliksi. Periaatteita hän liitti malleihin vain harvoin.

**Taulukko 5.19.** Tapausopettajien ja -opiskelijoiden ilmiöiden selitysmallit periaatteineen kurssin aikana. Taulukossa on käytetty seuraavia lyhenteitä: KL = klassinen malli, KV = kvanttimalli, HB = hybridimalli, ER = epärelevantti ei kvanttikäsitteen vastainen malli, esp = energian säilymisperiaate, lsp = liikemäärän säilymisperiaate, kh = kvanttihypoteesi, lpt = lämpötasapaino.

	Tuomas	Timo	Lauri	Aapo
Alkutilanne				
Absorptio	KL + KV	HB	HB	KL
Emissio	KL + KV	HB	HB	KL
Sironta	KL	KL	KV	ER
Sm-säteilyn synty	KL + KV	KV	KV	KV
Compton				
Mallit ja periaatteet	<u>Esi:</u> KL + esp + lsp + kh <u>Jälki:</u> KV + esp + lsp	<u>Esi:</u> KL + esp <u>Jälki:</u> KL + esp + lsp + oma dualismi	<u>Esi:</u> HB <u>Viiv:</u> KV + esp + lsp	<u>Esi:</u> - <u>Viiv:</u> lsp
VS-ilmiö				
Mallit ja periaatteet	<u>Esi:</u> HB + esp <u>Jälki:</u> KV + esp + kh	<u>Esi:</u> HB + esp + oma dualismi <u>Jälki:</u> KL + esp + oma dualismi	<u>Esi:</u> HB <u>Jälki:</u> KL + esp	<u>Esi:</u> KL <u>Jälki:</u> KL
MK:n säteily				
Mallit ja periaatteet	<u>Esi:</u> KV + kh <u>Jälki I:</u> KV + ltp <u>Jälki II:</u> KV + kh + ltp	<u>Esi:</u> - <u>Jälki I:</u> - <u>Jälki II:</u> -	<u>Esi:</u> - <u>Jälki I:</u> KV <u>Jälki II:</u> KV + kh <u>Jälki III:</u> HB <u>Viiv:</u> HB	<u>Esi:</u> - <u>Jälki I:</u> HB + kh <u>Jälki II:</u> HB + ltp <u>Viiv:</u> HB + kh

## 5.7 Kvanttiolioiden oppimisprosessien koonti

Oppijoiden elektroni- ja fotonimallien ominaisuuksien yksityiskohtainen tarkastelu fysiikan näkökulmasta on tehty luvuissa 5.2-5.5, joten luokittelua ei käsitellä syvällisesti tässä yhteydessä, pikemminkin pyritään tiivistettyyn esitystapaan. Taulukoitujen elektroni- ja fotonimallien yhteydessä on esitetty mallien ominaisuuksien luokittelu tieteellisesti hyväksyttäviin, vaatimattomiin, klassisiin ja omiin käsityksiin. Elektroni- ja fotonimallien ominaisuudet on koottu liitteisiin 11 ja 12 (s. 260 ja s. 262).

### 5.7.1 Elektronimallit

Kaikki tapaukset mainitsivat elektronin ominaisuuksiksi massan ja alkeisvarauksen, joten niitä ei käsitellä elektronimallien oppimisprosessien yhteenvedojen yhteydessä.

#### **Tapausopettaja Tuomas**

Kurssin alussa tapausopettaja Tuomas esitti elektronin liikkeen kuvailuun aineaalteoriaan liittyvää aaltomallia (taulukko 5.20, s. 190, ominaisuudet AM1-3). Kolmannessa haastattelussa hän toi esille, että aaltomalli kuvaa elektroniverhoa ja perusteli aaltomallin sopivuutta elektronin kuvaamiseen elektronin pienellä koolla. Hänen mukaansa esimerkiksi elektronia massiivisempia ytimen rakenneosia ei kuvata aaltomalleilla. Kurssin lopussa Tuomas kertoi, että elektronia voidaan kuvata aaltomallin avulla, jolloin sillä ei ole tiettyä paikkaa, vaan ”aalto ilmenee laajassa avaruuden osassa”. Kaikki hänen esittämänsä aaltomallit ovat fysiikan näkökulmasta<sup>54</sup> epärelevantteja.

Kurssin alussa Tuomas toi myös esille, että elektronin aallonpituus voidaan laskea aineaalteorian<sup>55</sup> avulla. Toisessa haastattelussa hän kuitenkin esitti virheellisesti, että elektronin aallonpituus ja taajuus saadaan aaltoliikkeen perusyhtälön avulla (taulukko 5.20, s. 190, ominaisuus A6). Muissa haastattelussa aallonpituuden ja taajuuden käsitteet jäivät maininnan tasolle. Elektronin interferenssi-ilmiön Tuomas tunsi jo kurssin alussa.

Paikan käsitteen Tuomas liitti elektroniin hieman eri tavoin kurssin eri vaiheissa. Hän esitti, että elektronin paikkaa voidaan kuvata todennäköisyysjakauman avulla, mutta ei määritellyt tätä seikkaa tarkemmin (Taulukko 5.20, s. 190, ominaisuus TN5). Elektronin paikasta Tuomas totesi kurssin alussa vain, että se on olemassa.

---

<sup>54</sup> Kvanttifysiikassa aaltofunktio (Schrödingerin yhtälö) sisältää kaiken tiedon elektronin tilasta ja sen amplitudin neliö on verrannollinen elektronin esiintymisen todennäköisyyteen tietyssä pisteessä tietyllä ajanhetkellä (Born 1964). On epärelevanttia puhua elektronin liikkeestä, koska siitä ei voida saada tietoa. Schrödingerin yhtälöä voidaan soveltaa kaikille massallisille kvanttifysiikan hiukkasille.

<sup>55</sup> Historiallisen de Broglie'n aineaalteorian mukaan elektronille voidaan laskea aallonpituus, jota kutsutaan de Broglie'n aallonpituudeksi tai aineaallonpituudeksi.



Kolmannessa haastattelussa Tuomas kertoi, että elektronin paikka on vaikea määrittää. Kurssin lopussa Tuomas toi ilmi, että elektronilla ei ole tiettyä paikkaan vaan tila. Tilan käsite jäi kuitenkin maininnan tasolle.

Heisenbergin epätarkkuusperiaatteeseen Tuomas viittasi elektronin yhteydessä vain yhdessä haastattelussa, jossa hän kuitenkin ymmärsi sen fysikaalisesta tulkinnasta poikkeavalla tavalla (Taulukko 5.20, s. 190, ominaisuus H1).

Tuomaan elektroniin liittämistä ominaisuuksista fysikaalisesti järkeviä ovat liike-energia valosähköisessä ilmiössä, identifioitumattomuus ja laaja-alaisuus. Elektronilla voidaan klassisessa tarkastelussa ajatella olevan liike-energiaa, kun se sijaitsee sähkökentässä. Identifioitumattomuus eli yksilöitymättömyys ja laaja-alaisuus ovat elektronin kvanttiominaisuuksia. Fysiikan näkökulmasta epärelevantteja Tuomaan kertomista ominaisuuksista ovat irrotustyö, liikemäärä, amplitudi sekä liike-, lepo-, massan ja kokonaisenergiat. Irrotustyö ei ole elektronin ominaisuus, vaan metallin. Amplitudia ja klassista liikemäärää ei ole mielekästä liittää elektronin ominaisuudeksi, kuten ei myöskään energian lajeja.

**Taulukko 5.20.** Tuomaan elektronimallin ominaisuudet osa-alueittain kurssin aikana. Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muita ominaisuuksia ei ole luokiteltu, vaan ne on esitetty sanallisesti.

OSA-ALUE	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4
Aaltoluonne & - liike	<b>A2</b>	A1		
De Broglien teoria	<b>BR1</b>	<b>BR1</b>		
Paikka, tila ja paikan tn-tulkinta	<b>TN5</b>	<b>P1</b>	P4, TN7	<b>P7, TN4</b>
Oma käsitys: aaltomalli	AM1		AM2	AM3
Heisenbergin epätarkkuus		H1		
Olemus	<b>O4</b>	<b>O5</b>		O6
Muut ominaisuudet		Liike-energia Massan energia Lepoenergia Kokonaisene rgia Liikemäärä Amplitudi		<b>Liike- ja maksimi- energia vs- ilmiössä Identifioi- tumaton Laaja- alainen*</b>

A1: Oma käsitys: elektronin aallonpituus saadaan aaltoliikkeen perusyhtälön avulla; **A2**: Elektronisuihkulla saadaan samanlainen interferenssikuvio kuin näkyvällä valolla

**BR1**: Elektronin aallonpituus saadaan aineaalteorian avulla

**P1**: Elektroneilla on tietty paikka; P4: Oma käsitys: elektronien paikka on vaikea määrittää;

P7: Oma käsitys: elektronilla ei ole tiettyä paikkaa vaan tila

**TN5**: Elektronin esiintymiselle voidaan esittää tn-jakauma; **TN4**: Elektroniverhoja kuvataan sumun kaltaisina alueina, joissa elektroni jollakin tn:llä sijaitsee; TN7: Vaatimaton käsitys: aaltomekaniikka antaa tn-jakauman elektronin sijainnista

AM1: Oma käsitys: luonteeltaan ei-klassinen aaltomalli kuvaa elektronin liikettä; AM2:

Oma käsitys: luonteeltaan ei-klassinen aaltomalli kuvaa elektroniverhoa; AM3: Oma käsitys: luonteeltaan ei-klassinen aaltomalli kuvaa elektronia;

H1: Oma käsitys: Heisenbergin epätarkkuusperiaate antaa tarkkuuden, jolla elektroni on määritelty hiukkasena; **O4**: Elektronilla ei ole sisäistä rakennetta; **O5**: Elektronilla saattaa olla sisäinen rakenne, tiede ei vaan vielä sitä onnistunut osoittamaan; O6: Oma käsitys: elektronilla on sisäinen rakenne

\***Laaja-alainen** = ilmenee laajassa avaruuden osassa.

### **Tapausopettaja Timo**

Tapausopettaja Timo esitti toisessa haastattelusta, että de Broglien hypoteesit antavat elektronin aallonpituuden ja taajuuden, mutta ei kertonut tarkemmin miten aallonpituus ja taajuus määritellään (taulukko 5.21, s. 192, ominaisuudet A3 ja A5). Hänen käsityksensä dualismista poikkesi tieteellisestä käsityksestä; hän ajatteli dualismin tarkoittavan hiukkasen massan ja aallon vastaavuutta. Dualismikäsitteet säilyivät muuttumattomana koko kurssin ajan ja tulivat esille kaikissa haastatteluissa (taulukko 5.21, s. 192, ominaisuus D1).

Kuten taulukosta 5.21 havaitaan, Heisenbergin epätarkkuusperiaate ei ollut Timolle kovin tuttu. Hän viittasi siihen toisessa ja kolmannessa haastattelussa, mutta ei hallinnut sen sisältöä ja merkitystä täsmällisesti.

Timo esitti ensimmäisessä ja toisessa haastattelussa, että elektronilla on fyysinen koko, mutta kolmannessa kertoi elektronin olevan pistemäinen. Toisessa haastattelussa hän esitti elektronien liikkuvan suurilla nopeuksilla tietyillä energiatasoilla, mutta kutsui niitä kolmannessa haastattelussa orbitaaleiksi. Kurssin lopussa Timo liitti etenemissuunnan käsitteen elektroneihin. Hänen käsityksissään ilmeni klassisen rata-käsitteen liittäminen elektronin ominaisuudeksi. Lisäksi Timon elektroniin liittämät muut ominaisuudet, liike-energia ja liikemäärä, ovat klassisen kappaleen ominaisuuksia, eivät elektronin.

### **Tapausopiskelija Aapo**

Tapausopiskelija Aapo liitti aalto- ja hiukkasluonteen käsitteen elektroniin kurssin lopussa ja viivästetyssä haastattelussa (taulukko 5.22, s. 193, ominaisuus D2). Käsite jäi maininnan tasolle, mutta hän viittasi sillä ilmiöihin joiden yhteydessä käsitettä käytetään. Aalto-ominaisuuksia hän ei tuonut esille elektronin yhteydessä.

Toisessa haastattelussa Aapo liitti elektroniin rata- ja kiertoratakäsitteet, kuten myös elektronin paikan tarkkuuden. Toisaalta samassa haastattelussa hän esitti tieteellisesti hyväksyttävämmän käsityksen, jonka mukaan atomissa elektronin paikka voidaan esittää vain tietyllä todennäköisyydellä. Aapo myös ajatteli, että elektronin koko voidaan mitata sen massallisuudesta johtuen.

Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen sisällön ja merkityksen Aapo esitti elektronin yhteydessä kurssin lopussa. Muista hänen mainitsemistaan ominaisuuksista tieteellisen käsityksen mukaisia olivat liike- ja potentiaalienergia valosähköisessä ilmiössä ja potentiaalienergia sähkökentässä. Nämä suureet liittyvät kuitenkin elektronin klassiseen tarkasteluun sähkökentässä, mutta tämän seikan Aapo toi haastatteluissa esille. Elektronin kvanttiominaisuus yksilöitymättömyys jäi maininnan tasolle.

Tieteellisen käsityksen vastaisia ominaisuuksia olivat Aapon mainitsemat klassiset liike-energia ja liikemäärä. Myöskään irrotustyö ei ole elektronin, vaan metallin ominaisuus.

**Taulukko 5.21.** Timon elektronimallin ominaisuudet osa-alueittain kurssin aikana. Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muita ominaisuuksia ei ole luokiteltu, vaan ne on esitetty sanallisesti.

OSA-ALUE	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4
De Broglien teoria		<b>BR1, BR2</b>	<b>BR3</b>	
Oma käsitys: dualismi	D1	D1	D1	D1
Paikka, tila ja paikan tn-tulkinta		<b>P1, P4, T1</b>	P4, P5, TN1, TN2	P2
Heisenbergin epätarkkuus		H2	H3	
Rata & kiertorata		R6	R1, <b>R4</b>	R2
Olemus	O2	O2	<b>O3</b>	
Muut ominaisuudet		Liike-energia Liikemäärä		

**BR1:** Elektronin aallonpituus saadaan de Broglien hypoteesien avulla; **BR3:** Elektronin aineaallonpituus eli de Broglien aallonpituus on kertaluokkaa  $10^{-15}$ m; **BR2:** Elektronin taajuus saadaan de Broglien hypoteesien avulla

D1: Oma käsitys: Dualismi tarkoittaa, että hiukkasen massa vastaa jotakin aaltoa

**P1:** Elektroneilla on tietty paikka; P2: Oma käsitys: elektronit ovat lokalisoituvia; P4: Oma käsitys: elektronien paikka on vaikea määrittää; P5: Oma käsitys: Schrödingerin yhtälön ratkaisuna saatava aaltoyhtälö kuvaa elektronin paikkaa; **T1:** Elektroneilla on tietyt tilat/energiatilat

TN2: Vaatimaton käsitys: elektronit sijaitsevat jossain tietyillä todennäköisyydellä; TN1:

Oma käsitys: Energiatasot voidaan ymmärtää orbitaaleina, joissa elektronit todennäköisimmin sijaitsevat

H2: Vaatimaton käsitys: Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen mukaan elektronin paikka on epätarkka; H3: Vaatimaton käsitys: Heisenbergin epätarkkuus liittyy liikemäärän epätarkkuuteen

R1: Oma käsitys: elektronit liikkuvat suurilla nopeuksilla; R2: Oma käsitys: elektronien etenemissuunta muuttuu esim. kaksoisraoissa; **R4:** Klassinen käsitys: elektroneilla on liikerata sähkökentässä; R6: Oma käsitys: elektronit liikkuvat suurilla nopeuksilla energiatasoilla

O2: Oma käsitys: fyysinen koko; **O3:** Pistemäinen

**Taulukko 5.22.** Aapon elektronimallin ominaisuudet osa-alueittain kurssin aikana. Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muita ominaisuuksia ei ole luokiteltu, vaan ne on esitetty sanallisesti.

OSA-ALUE	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4	Haastattelu 5
Dualismi				<b>D1</b>	<b>D2</b>
Rata & kiertorata		R3, R5			
Paikka, tila ja paikan tn-tulkinta		P3, TN3			
Heisenbergin epätarkkuus				<b>HB4</b>	
Olemus		O1			
Muut ominaisuudet	<b>Liike- ja potentiaali energia VS- ilmiössä</b>	<b>Potentiaali energia sähkö- kentässä</b> Liike-energia Liikemäärä	Irrotustyö	<b>Yksilöitymätön Liike-energia VS- ilmiössä</b>	

D1: Vaatimaton käsitys: elektronilla on aalto- ja hiukkasluonne, merkitys epäselvä; **D2**: Elektronin aalto- ja hiukkasluonne liittyy ilmiöihin esim. diffraktio [kaksoisrakokoe] ja törmäykset

P3: Oma käsitys: laatikossa sijaitsevan elektronin paikka tunnetaan tarkasti, **TN3**: Atomissa elektroni sijaitsee tietyllä tn:llä jossain alueessa

**HB4**: Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen mukaan paikkaa ja liikemäärää ei voida tuntea tarkasti (kaava mainittu)

R5: Klassinen käsitys: elektronit kiertävät ydintä atomissa; R3: Klassinen käsitys: elektronien liike on sähkövirtaa

O1: Oma käsitys: mitattavissa oleva fyysinen koko massasta johtuen

### Tapausopiskelija Lauri

Tapausopiskelija Lauri liitti aalto- ja hiukkasluonteen elektroniin toisesta haastattelusta lähtien (taulukko 5.23, s. 194). Hän myös ymmärsi käsitteen merkityksen tieteellisesti hyväksyttävällä tavalla. Toisessa haastattelussa hän myös esitti, että elektronin taajuus voidaan ratkaista de Broglien teorian avulla.

Elektronin paikkaan liittyen Lauri toi esille radan ja kiertoradan käsitykset. Kurssin lopussa kiertoradan käsite yhdistyi tilan käsitteen kanssa. Hän ei kuitenkaan tarkemmin selittänyt, mitä hän tilan käsitteellä ymmärtää. Toisaalta hän viittasi energiatilan käsitteen sekä kurssin alussa että sen lopussa, joten on todennäköistä, että

hän tarkoitti tilan käsitteellä energiatilaa myös tässä yhteydessä. Lisäksi toisessa haastattelussa Lauri esitti elektronin paikalle todennäköisyystulkinnan.

Muista ominaisuuksista Lauri mainitsi eri energianmuotoja, kuten liike-, potentiaali- ja massan energian sekä liikemäärän. Nämä ominaisuudet eivät ole aidosti elektronin ominaisuuksia.

**Taulukko 5.23.** Laurin elektronimallin ominaisuudet osa-alueittain kurssin aikana. Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muita ominaisuuksia ei ole luokiteltu, vaan ne on esitetty sanallisesti.

OSA-ALUE	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4	Haastattelu 5
De Broglien teoria		<b>BR2</b>			
Dualismi		<b>D3</b>			D1
Rata & kiertorata	R5, R3			R3	R7
Paikka, tila ja paikan tn-tulkinta	<b>T2</b>	<b>T2, TN6</b>			<b>T2</b>
Olemus		O2			
Muut ominaisuudet		Massan energia Potentiaalienergia Liikemäärä		Energia ja liikemäärä magn. kentässä	

**BR2:** Elektronin taajuus saadaan de Broglien teorian avulla

**D3:** Aaltoluonne eli aalto-ominaisuudet voidaan havaita kaksoisrakokokeessa & hiukkasluonne eli hiukkasominaisuudet kuten massa ja varaus, D1: Vaatimaton käsitys: elektronin aalto- ja hiukkasluonne mainittu

R5: Klassinen käsitys: elektronit kiertävät ydintä atomissa; R7: Oma käsitys: elektronien kiertäessä atomissa ne voivat olla vain tietyillä [energia]tiloilla; R3: Klassinen käsitys: metallin vapaiden elektronien liike on sähkövirtaa

**T2:** Elektronit ovat atomissa energiatiloilla; **TN6:** Elektronin paikan jossain voi ennustaa jollakin tarkkuudella / todennäköisyysjakauma;

O2: Oma käsitys: elektronilla on fyysinen koko

## 5.7.2 Fotonimallit

Tässä alaluvussa esitetään tiivistetysti tapausopettajien ja -opiskelijoiden fotonimallit ominaisuuksineen. Luokitellut ominaisuudet esitetään myös taulukoituina. Tieteellisen käsityksen mukaisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan kvanttimallin ominaisuuksia.


### **Tapausopettaja Tuomas**

Tuomaan käsitys aaltoliikkeen tai -luonteen liittymisestä fotonin vaihteli kurssin aikana (taulukko 5.24, s. 196, ominaisuudet A1 ja A5). Hän sekä määritteli fotonin aaltoliikkeeksi että kertoi fotonilla olevan aalto-ominaisuuksia. Kurssin lopussa hän esitti, että fotonin sijaintia voidaan kuvata ei-klassisen aaltomallin avulla, kuten elektronin sijaintia.

Hiukkasluonteen merkitys vaihteli Tuomaan esille tuomissa käsityksissä (taulukko 5.25, s. 196, ominaisuudet H1, H2 ja H5). Hän muun muassa kutsui fotonia sähkömagneettisen säteilyn hiukkasluonteeksi, kertoi fotonin kuvaavan valon hiukkasluonnetta ja sanoi fotonilla olevan hiukkasominaisuuksia. Tuomaan hiukkasluonteen käsityksillä on yhtenevyyttä hänen kurssin aikana esille tuomansa valon rakenneosamallin kanssa, joka kuitenkin kurssin loppupuolella korvautui osittain välittäjähiukkasmallilla, jossa valon ja materian välinen vuorovaikutus tapahtuu fotoneina. Huolimatta rakenneosamallista, Tuomas ymmärsi jo kurssin alussa emission ja absorption tapahtumiksi, joissa fotoni syntyy ja kuolee, ja toi tätä ajattelutapaa esille myös kurssin aikana.

Tuomas toi kaikissa haastatteluissa esille fotonin energian yhtälön fysikaalisesti oikealla tavalla. Samoin hän esitti kaikissa haastatteluissa fotonin liikemassan, joka ei ole fysiikan kannalta tarpeellinen käsite. Fotonin liikemäärän käsitteen kanssa hänellä oli ymmärtämisen vaikeuksia, koska hän sanoi sen olevan verrannollinen fotonin liikemassaan. Muista fotonin ominaisuuksista Tuomas mainitsi laaja-alaisuuden, interferoituvuuden ja yksilöitymättömyyden, jotka ovat fotonin kvantti-ominaisuuksia.

**Taulukko 5.24.** Tuomaan fotonimallin ominaisuudet osa-alueittain kurssin aikana. Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muita ominaisuuksia ei ole luokiteltu, vaan ne on esitetty sanallisesti. Nuoli symboloi kognitiivista ristiriitaa.

OSA-ALUE	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4
Aaltoluonne & - liike		A1, A5	A5	A5
Oma aaltomalli				AM1
Hiukkasluonne	<b>H1</b>	<b>H2</b>		H4
Rakennesamalli	R1	R2	 R2	
Välittäjähiukkanen			<b>V7</b>	<b>V7</b>
Olemus	O3		O1	
Syntyminen & kuoleminen	<b>SK4</b>			
Liikemassa	M1	M1	M1	M1
Energia & liikemäärä	<b>E2</b>	<b>E2, P2</b>	<b>E2, P1</b>	<b>E2, P1</b>
Muut ominaisuudet	<b>Lepo- massaton</b>			<b>Laaja- alainen* Interfe- roituva Yksilöity- mätön Lepo- massaton</b>

A1: Oma käsitys: fotonit ovat aaltoliikettä; A5: Vaatimaton käsitys: fotoneilla on aaltoluonne / aalto-ominaisuuksia (ei esimerkkejä);

AM1: Oma käsitys: ei-klassinen aaltomalli kuvaa fotonin sijaintia

**H1**: Fotonit ovat sm-säteilyn hiukkasluonne; **H2**: Fotonit kuvaavat valon hiukkasluonnetta;

H4 Vaatimaton käsitys: fotoneilla on hiukkasluonne / -ominaisuuksia (ei esimerkkejä)

R1: Klassinen käsitys: fotonit ovat valohiukkasia; R2: Klassinen käsitys: valo koostuu fotoneista

**V7**: Valo on aaltoliikettä ja sen vuorovaikutus aineen kanssa tapahtuu fotoneina

O1: Oma käsitys: fotonit ovat todellisia, koska ne ilmenee aineen ja säteilyn vuorovaikutuksessa; O3 Oma käsitys: fotoni on malli valon kuvaamiseen

**SK4**: Fotonit syntyvät emissiossa ja kuolevat absorptiossa

M1: Oma käsitys: fotonilla on liikemassa (mainittu); **E2**: Fotonin energia on  $E = hf$ ; P1:

Vaatimaton käsitys: Fotonin liikemäärä mainittu; P2: Oma käsitys: fotonin liikemäärä on verrannollinen (liike)massaan

\***Laaja-alainen**: ilmenevät laajassa avaruuden osassa



### **Tapausopettaja Timo**

Tapausopettaja Timo määritteli fotonit poikittaiseksi aaltoliikkeeksi ja sanoi fotoneilla olevan aalto-ominaisuuden (taulukko 5.25, s. 198, ominaisuudet A2 ja A3). Hiukkasluonnetta Timo sen sijaan ei liittänyt fotoniiin lainkaan. Timon käsitys fotonista valon rakenneosana poikkesi tavanomaisesta valon rakenneosamallista, koska Timo ajatteli valon koostuvan valoalloista, ei valohiukkasista.

Timo toi esille välittäjähiukkasmallin ominaisuuksia (taulukko 5.25, s. 198, ominaisuudet V1, V3-5). Kurssin alussa hän pyrki määrittelemään fotonin sähkömagneettisen säteilyn energian välittäjäksi ja energiansiirron mekanismiksi. Kolmannessa haastattelussa hän määritteli fotonin fysiikan kannalta täsmällisemmin sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkaseksi.

Kurssin alussa Timo kertoi fotonin kuvaavan vuorovaikutustapahtumasta saatavaa tietoa mutta kurssin lopussa määritteli fotonin malliksi, jolla selitetään tiettyjä ilmiöitä. Fotonin syntyisestä ja kuolemista hänellä oli tieteellisen käsityksen vastaisia käsityksiä kurssin aikana. Toisessa haastattelussa hän esitti fotonin energian yhtälön ja epärelevantin käsityksen fotonin liikemassasta ja liikemäärästä.

Muista ominaisuuksista Timo mainitsi taajuuden ja amplitudin, jotka eivät ole varsinaisesti fotonin ominaisuuksia, vaan valon. Nämä ominaisuudet ovat koherentteja Timon aaltomaisen fotonikäsitelmän kanssa.

**Taulukko 5.25.** Timon fotonimallin ominaisuudet osa-alueittain kurssin aikana. Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muita ominaisuuksia ei ole luokiteltu, vaan ne on esitetty sanallisesti.

OSA-ALUE	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4
Aaltoluonne & aaltoliike		A2		A3
Hiukkasluonne				H3
Rakennesamalli		R2	R2	R2, R3
Välittäjähiukkanen	V3, V4	V1	V5	
Olemus	O2		O4	O4
Syntyminen & kuoleminen	SK2		SK3	SK1
Liikemassa		M2		
Energia & liikemäärä		P2, E2		P1, E1
Muut ominaisuudet		Taajuus Amplitudi		

A2: Oma käsitys: fotonit ovat poikittaista aaltoliikettä; A3: Oma käsitys: fotoneilla on aalto-ominaisuus, esim. näkyvä valo on tasoaalto; H3: Oma käsitys: fotoneilla ei ole hiukkasluonnetta; R2: Klassinen käsitys: valo koostuu fotoneista; R3: Oma käsitys: valo koostuu valoalloista eli fotoneista

V1: Oma käsitys: fotonit ovat sm-säteilyn välittäjähiukkasia; V3: Oma käsitys: fotonit ovat energian välittäjiä, ne kuvaavat energian olemusta sm-säteilyssä; V4: Oma käsitys: fotonit ovat energiansiirron mekanismi; V5: Fotonit ovat sm-vuorovaikutuksen välittäjähiukkasia  
O2: Oma käsitys: fotonit kuvaavat vuorovaikutustapahtumasta saatavaa tietoa; O4: Fotoni on malli, jonka avulla selitetään tiettyjä ilmiöitä / sm-ilmiöiden syntyä ja käyttäytymistä  
SK1: Oma käsitys: fotonit häviävät levossa; SK2: Oma käsitys: fotonit lakkaavat olemasta vuorovaikutuksessa; SK3: Oma käsitys: fotoni voi muuttaa muotoaan: sen energia muuttuu esim. valosähköilmiössä elektronin liike-energiaksi ja irrotustyöksi

M2: Oma käsitys: fotonin liikemassa voidaan laskea massan ja energian yhteyden avulla; E1: Fotonilla on tietyn suuruinen energia; E2: Fotonin energia on  $E = hf$ ; P1: Vaatimaton käsitys: fotonin liikemäärä mainittu; P2: Oma käsitys: fotonin liikemäärä on verrannollinen (liike)massaan

### **Tapausopiskelija Aapo**

Aapo esitti kurssin alussa käsityksen, jonka mukaan fotonit tarvitaan valon aalto- ja hiukkasluonteen vuoksi. Hiukkasluonteen merkitys oli kuitenkin hänelle epäselvä ja aaltoluonteen hän ajatteli tarkoittavan, että fotonilla on valon ominaisuuksia, kuten sähkö- ja magneettikentät (taulukko 5.26, s. 200, ominaisuus D3). Aalto- ja hiukkasluonteen hän mainitsi myös kurssin lopussa ja viivästetyssä haastattelussa. Näiden mainintojen lisäksi Aapo ei liittänyt muita aalto-käsitteitä fotonisiin.

Toisessa haastattelussa Aapo määritteli fotonin valon hiukkasluonteeksi ja kertoi fotonin kuljettavan valoa, valokvanttia tai energiaa (taulukko 5.26, ominaisuus R4). Kurssin alusta lähtien hän myös pyrki määrittelemään fotonin valon tai sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkaseksi ja kurssin lopussa hänen esittämänsä määritelmä oli melko lailla tieteellisen käsityksen mukainen, joskin keskittyi vain energian suureeseen. Kurssin lopussa Aapo myös esittää Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen sisällön ja merkityksen.

Fotonin tietyn suuruisen energian Aapo mainitsi kolmannessa haastattelussa ja epärelevantin käsityksen fotonin liikemäärästä kurssin lopussa. Muista ominaisuuksista Aapo kertoi vain yhden, yksilöitymättömyyden, jota ei kuitenkaan tarkemmin perustellut.

### **Tapausopiskelija Lauri**

Lauri toi esille naiivin käsityksen dualismista, jonka mukaan fotonit ovat sekä hiukkanen että aalto (taulukko 5.27, s. 201, ominaisuus D1). Toisessa haastattelussa Lauri mainitsi fotonin aalto- ja hiukkasluonteen ja kurssin lopussa kertoi, että hiukkas- ja aaltoluonne voidaan havaita kaksoisrakokokeissa ja Comptonin ilmiössä. Muita aaltokäsitteitä Lauri ei liittänyt fotonisiin.

Lauri toi toisessa ja kolmannessa haastattelussa esille rakenneosamallin piirteitä; hän sanoi valon koostuvan fotoneista ja aalloista eli valokvanteista (taulukko 5.27, s. 201, ominaisuudet R2-3). Kurssin alussa hän määritteli fotonin sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkaseksi, joka välittää tietoa.

Heisenbergin epätarkkuusperiaate jäi maininnan tasolle toisessa haastattelussa. Fotonin syntymisen ja kuoleamisen sekä kaavat fotonin energialle ja liikemäärälle Lauri toi ilmi kurssin lopussa.

**Taulukko 5.26.** Aapon fotonimallin ominaisuudet osa-alueittain kurssin aikana. Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muita ominaisuuksia ei ole luokiteltu, vaan ne on esitetty sanallisesti.

OSA-ALUE	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4	Haastattelu 5
Dualismi	<b>D3</b>			<b>D4</b>	<b>D4</b>
Hiukkas- luonne		H1			
Rakenne- osamalli		R4			
Välittäjä- hiukkanen	V1	V1		<b>V6</b>	
Olemus		O3			
Heisenberg				<b>HB2</b>	
Energia & liikemäärä			<b>E1</b>	P3	
Muut ominaisuudet				<b>Yksilöity- mätön</b>	

D3: Oma käsitys: fotonit tarvitaan valon dualistisen eli aalto- ja hiukkasluonteen vuoksi, aaltoluonne = fotonilla on valon ominaisuuksia, kuten sähkö- ja magneettikentät, hiukkasluonne epäselvä; **D4**: Fotoneihin liittyy hiukkas- ja aaltoluonnetta vaativia ilmiöitä (diffrakto ja törmäykset); H1: Fotonit ovat valon hiukkasluonne

R4: Oma käsitys: fotonit ovat energian kuljettajia, ne kuljettavat valokvantteja, energiaa tai valoa

V1: Oma käsitys: fotonit ovat sm-säteilyn / valon välittäjähiukkasia; **V6**: Fotonit ovat sm-säteilyn välittäjähiukkasia, jotka välittää sm-vv:sta eli energiaa

O3: Oma käsitys: fotoni on valon kulun selittämiseen käytettävä malli

**HB2**: Heisenberg: paikkaa ja liikemäärää ei voida tuntea tarkasti (kaava mainittu)

**E1**: Fotonilla on tietty energia; P3: Oma käsitys: fotonilla on suunnattu liikemäärä = mc

**Taulukko 5.27.** Laurin fotonimallin ominaisuudet osa-alueittain kurssin aikana. Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muita ominaisuuksia ei ole luokiteltu, vaan ne on esitetty sanallisesti.

OSA-ALUE	Esitesti Haastattelu 1	Haastattelu 2	Haastattelu 3	Lopputesti Haastattelu 4	Haastattelu 5
Dualismi	<b>D1</b>	<b>D3</b>			<b>D4</b>
Rakenne- osamalli		<b>R2</b>	<b>R2, R3</b>		
Välittäjä- hiukkanen	<b>V2</b>				
Syntyminen & kuoleminen				<b>SK4</b>	
Heisenbergin epätarkkuus		<b>HB1</b>			
Energia & liikemäärä			<b>E1</b>	<b>E2, P4</b>	

**D1:** Oma käsitys: fotonit ovat sekä hiukkasia että aaltoliikettä; **D3:** Vaatimaton käsitys: fotonien hiukkas- ja aaltoluonne mainittu; **D4:** Fotonien hiukkas- ja aaltoluonne voidaan havaita kaksoisrakokokeessa ja Comptonin ilmiössä

**R2:** Klassinen käsitys: valo koostuu fotoneista; **R3:** Oma käsitys: valo koostuu aalloista eli valokvanteista

**V2:** Oma käsitys: fotonit ovat sm-säteilyn välittäjähiukkasia, jotka välittävät tiedon jostain asiasta johonkin toiseen paikkaan

**SK4:** Fotonit syntyvät emissiossa ja kuolevat absorptiossa

**HB1:** Heisenbergin epätarkkuus liittyy paikan epätarkkuuteen

**E1:** Fotonilla on tietty energia, **E2:** Fotonin energia on  $E = hf$ ; **P4:** Fotonin liikemäärä on  $p = h/\lambda$

## 5.8 Lopputestin tulokset

Lopputestin tuloksista tarkastelun kohteena ovat mustan kappaleen säteilyn sekä fotonin ja elektronin kvanttiolioisuutta tarkastelevan tehtävän vastaukset (ks. liite 3, s. 250 sekä liite 4, s. 251). Mustan kappaleen säteily on kurssin keskeinen – ehkäpä myös vaativin – aihealue. Fotonin ja elektronin kvanttiolioisuuden ymmärtäminen on puolestaan eräs kurssin tavoitteista, joten on mielekästä tarkastella miten tavoite toteutuu lopputestin vastausten perusteella.

### 5.8.1 Mustan kappaleen säteily

Mustan kappaleen säteilyn hallintaa tarkasteltiin mustan kappaleen määritelmän ja mustan kappaleen säteilyn kvanttitulkin näkökulmasta. Vastaukset luokiteltiin kuten esitettiin vastauksetkin eli suhteellista luokittelua käyttäen. Heikoksi luokiteltu vastaus sisältää vähintään tietoa, tyydyttävä hieman enemmän tietoa ja hyvä eniten. Molempien ryhmien vastausten luokittelu on tehty samoja kriteerejä käyttäen, joten ryhmien tulosten vertaaminen toisiinsa on mahdollista.

#### A. Mustan kappaleen ymmärtäminen

Opiskelijoista puolet hallitsi vastauksensa perusteella mustan kappaleen käsitteen tyydyttävästi ja puolet heikosti (taulukko 5.21). Opettajista kuusi osoitti vastauksessaan hyvää hallintaa, neljä tyydyttävää ja neljä heikkoa hallintaa. Kaksi opettajaa ei määritellyt mustaa kappaletta lainkaan lopputestin vastauksessaan.

**Taulukko 5.21.** Opiskelijoiden ja opettajien mustan kappaleen käsitteen hallinnan taso lopputestissä.

OPETUSRYHMÄ	Vastauksen taso			
	Hyvä	Tyydyttävä	Heikko	Ei vastausta
Opiskelijat (n = 8)	-	4	4	-
Opettajat (n = 17)	6	4	4	3
Vastauksia yhteensä	6	8	8	3

Hyväksi luokiteltu vastaus oli sisällöltään virheetön tai sisälsi vain pieniä puutteita, kuten Eeron (opettaja) mustan kappaleen määritelmä:

**Eero:** Musta kappale on ideaalinen säteilijä. Se absorboi kaiken itseensä osuvan säteilyn. Se on termisessä tasapainossa ympäristönsä kanssa. Mustan kappaleen emittoima säteily kertoo kappaleen lämpötilan. Musta kappale ei ole väriltään musta vaan voi olla esim. tähti, Aurinko tai hehkulanka. Yleensä musta kappale esitetään onkalona, johon muodostuu tietty seisovien aaltojen määrä.

Tyydyttävä vastaus oli osittain oikein, mutta se ei sisältänyt kaikkea oleellista tietoa tai sisältää virheellisiä käsityksiä. Esimerkiksi Erkin (opiskelija) mustan kappaleen määritelmä luokiteltiin tyydyttäväksi:

**Erkki:** Mustana kappaleena pidetään kappaletta, joka absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn (esim. iridiumista tehty onkalo on hyvä musta kappale).

$$\frac{E_v}{A_v} = J(v, T),$$

missä  $E_v$  = emissioteho,  $A_v$  = absorptioteho ja  $J(v, T)$  = musta kpl emissioteho. Mustalle kappaleelle  $A_v = 1$  eli se absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn. Täydellistä mustaa kappaletta ei ole olemassa. Mm. Aurinkoa voidaan pitää mustana kappaleena.

Heikko vastaus oli tiedollisesti vaatimaton ja sisällöllisesti puutteellinen tai sisälsi useita virheellisiä käsityksiä. Esimerkiksi Eskon (opiskelija) mustan kappaleen säteilyn vastaus luokiteltiin heikkojen vastausten kategoriaan.

**Esko:** Mustalla kappaleella ymmärretään kappaletta, jonka  $A_v = 1$  eli kappale absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn. (...) Periaatteessa musta kappale voisi olla ontelo, jonne muodostuu lämpötasapaino.

## B. Mustan kappaleen säteilyn tulkinta

Opiskelijoista kaksi hallitsi mustan kappaleen säteilyn kvanttitulkinna hyvin, kolme tyydyttävästi ja kolmen tietämys oli heikkoa (taulukko 5.22). Opettajista kuusi osoitti vastauksessaan hyvää hallintaa, viisi tyydyttävää ja kolme heikkoa hallintaa. Lisäksi kaksi heistä ei tarkastelut aihetta lainkaan vastauksessaan.

**Taulukko 5.22.** Opiskelijoiden ja opettajien mustan kappaleen säteilyn kvanttitulkinna hallinnan taso lopputestissä.

OPETUSRYHMÄ	Vastauksen taso			
	Hyvä	Tyydyttävä	Heikko	Ei vastausta
Opiskelijat (n = 8)	2	3	3	-
Opettajat (n = 17)	6	5	3	3
Vastauksia yhteensä	8	8	6	3

Esimerkiksi Larin (opiskelija) vastaus oli hyvää tasoa.

**Lari:** Mustan kappaleen säteilyn ongelma oli ultraviolettikatastrofi. Klassisen fysiikan mukaan energian tasanjakoperiaate oli voimassa ja koska jokainen taajuus toimii aaltoliikkeen vapausasteena aaltoliike/musta kappale voisi varastoida energiaa mieli määrin eikä syntyisi lämpötasapainoa eikä kappaleiden lämpötila nousisi 0:sta kelvinitä. Ongelma ratkesi, kun ymmärrettiin energian kvantittuneisuus. Eli suuret taajuudet tarvitsevat virittyäkseen ison määrän energiaa kerralla, muutoin ne eivät virity => ei tapahdu UV-katastrofia.

Lasse (opiskelija) puolestaan hallitsi mustan kappaleen kvanttitulkinnan tyydyttävästi. Hänen viittauksensa säteilyn energian kvantittumiseen ei ole fysiikan näkökulmasta hyväksyttävä, koska hän ei viittaa lainkaan säteilyn vuorovaikutukseen materian kanssa. Lisäksi Lassen vastauksesta ei käynyt ilmi, miten hän ymmärtää vapausasteen käsitteen.

**Lasse:** Mustan kappaleen säteilyyn liittynyt ongelma oli, että lait johtivat ultraviolettikatastrofiin. Lakien mukaan kappaleet emittoisivat säteilyä näkyvän valon alueella jo huoneen lämpötilassa. Ongelma ratkesi, kun ymmärrettiin, että säteilyn energia on kvantittunut. Lyhytaaltoisen säteilyn vapausasteet tarvitsevat suuren määrän energiaa virittyäkseen.

Taunon (opettaja) vastaus oli tiedoiltaan heikko. Hän viittasi vain mustan kappaleen säteilyn intensiteettimaksimin siirtymiseen todeten, että energia on kvantittunut.

**Tauno:** Klassista käsitystä seuraisi ultraviolettikatastrofi. (...) Intensiteettimaksimi siirtyy vasemmalle, kun lämpötila nousee. Energia on kvantittunut.

### 5.8.2 Elektronin ja fotonin kvanttiolioisuus

Opiskelijoiden elektronin ja fotonin kvanttiolioisuuden ymmärtämistä tarkastellaan seuraavaksi heidän lopputestin vastaustensa perusteella. Vastaukset luokiteltiin sen perusteella, miten hyvin vastauksessa ilmaistu malli on yhtenevä opetuksen tavoitteena olleen mallin kanssa. Kaikki opiskelijoiden vastaukset voitiin luokitella, mutta neljän opettajan (Paavo, Unto, Janne ja Olavi) vastaukset olivat tiedollisesti niin heikkoja ettei niitä voitu luokitella. Lisäksi Jorma ei vastannut lainkaan tähän tehtävään.

Vastausten perusteella muodostetut mallit ovat elektronin ja fotonin kvanttimalli, esikvanttimalli, hybridimalli ja klassinen malli. Kuhunkin vastauskategoriaan kuuluvista vastauksista esitetään seuraavaksi esimerkkejä. Luokiteltujen vastausten ristiintaulukointia kuvaa taulukko 5.23 (s. 205).



**Taulukko 5.23.** Opiskelijoiden elektroni- ja fotonimallien ristiintaulukointi lopputestin vastausten perusteella. Ryhmä I = opiskelijoiden opetusryhmä ja ryhmä II = opettajien opetusryhmä. Tapausopettajia ovat Tuomas ja Timo ja tapausopiskelijoita Aapo ja Lauri.

		Elektronimalli				Frekvenssi
		KL	HB	ESI-KV	KV	
Fotonimalli	KL	Aapeli (II)				1
	HB		<b>Timo* (II)</b>	Lasse (I) Leevi (I) Pertti (I) Veijo (II)		5
	ESI-KV		<b>Tuomas (II)</b>	<b>Aapo (I)</b> Esko* (I) Juhani* (II) Tauno (II) Uolevi (II)		6
	KV		Erkki (I) Lari (I) <b>Lauri (I)</b> Heikki (II)	Kalevi (II)	Eero (II) Usko (II) Viljo (II)	8
frekvenssi		1	6	10	3	20

\*heikko käsitys

### Fotonin kvanttimalli

Lari (opiskelija) määritteli fotonin sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkaseksi, joka välittää energiaa, liikemäärää ja pyörimismäärää. Hänen mukaansa bosoneihin kuuluvan fotonin spin on yksi ja fotoni on massaton, varaukseton ja se etenee valon nopeudella. Hän esitti, että fotonit ilmenevät vain vuorovaikutustilanteissa, eikä niillä ole sisäistä rakennetta. Lisäksi hän mainitsi, että fotoni on itse oma antihiuksensa.

Tulkinta. Larin fotonimalli on suurelta osin opetuksen tavoitteiden mukainen, eikä sisällä muiden mallien piirteitä. Tärkeät kurssin fotonimallin ominaisuudet, ilmeneminen vuorovaikutustapahtumissa ja toimiminen energian, liikemäärän ja pyörimismäärän välittäjänä, on mainittu Larin vastauksessa.

### **Fotonin esikvanttimalli**

Aapo (opiskelija) kertoi, että fotonit voidaan ajatella kvanttiolioiksi, jolloin ne eivät ole yksilöityviä, eikä niiden paikkaa ja liikemäärää voida tuntea tarkasti (Heisenbergin epätarkkuus pa.  $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ ) vaan puhutaan todennäköisyyksistä. Hänen mukaansa fotoneihin liittyy sekä hiukkas- että aaltoluonnetta vaativia ilmiöitä (diffraktio ja törmäykset), joita ei kyetä klassisesti selittämään. Fotonin tapauksessa voidaan puhua vain suunnatusta liikemäärästä. Lopuksi hän toi esille, että fotoni on välittäjähiukkanen. Sulut ovat tässä esimerkissä Aapon.

Tulkinta. Aapon fotonimalli luokituu esikvanttimalliksi.

### **Fotonin hybridimalli**

Leevi (opiskelija) määritteli fotonin valohiukkaseksi, joka on varaukseton ja lepomassaton, mutta jonka liikemassa voidaan määrittää. Hänen mukaansa fotoni toimii sähköisen vuorovaikutuksen välittäjänä ja sillä on hiukkas- ja aaltoluonne sekä säteilyn taajuudesta riippuva energia.

Tulkinta. Leevin lopputestissä ilmaisema fotonimalli luokituu hybridifotonimalliksi, koska se sisältää sekä opetusmallin piirteitä (sähköisen vuorovaikutuksen välittäjä, hiukkas- ja aaltoluonne, taajuudesta riippuva energia) että rakenneosamallin ominaisuuksia (valohiukkanen, liikemassa voidaan määrittää).

### **Fotonin klassinen malli**

Aapeli (opettaja) esitti fotonin olevan valokvantti eli kuljettavan mukanaan energiaa kvanteissa. Energian suuruus riippuu etenevän sähkömagneettisen säteilyn taajuudesta. Hänen mukaansa fotonin käyttäytyminen poikkeaa klassisen mekaniikan laeista. Esimerkiksi fotonin osuessa atomiin se ei välttämättä siroa samaan suuntaan kuin mistä se tuli. Hän kertoi, että fotoni menettää energiaa vuorovaikutuksessa elektronin kanssa, jolloin sen aallonpituus muuttuu. Täten fotonilla voidaan ajatella olevan myös aaltoluonne. Hänen mukaansa fotonia voidaan tarkastella sekä hiukkasena että sen liikkua aaltona. Lopuksi Aapeli totesi, että yleensä fotonin tarkastelussa käytetään klassisen mekaniikan lakeja, mutta se ei riitä tiettyjen tapahtumien/ilmiöiden tarkastelussa.

Tulkinta. Aapelin vastauksen perusteella vaikuttaa siltä, ettei hän ole oppinut kurssin fotonimallista juuri mitään. Hän määritteli fotonin valokvantin kuljettajaksi eli ei ymmärtänyt ftonia ja valokvanttia synonyymeiksi. Lisäksi vaikuttaa siltä, ettei Aapeli ymmärrä sirontailmiötä edes klassisesti. Samoin Aapelin käsitys fotonin energian menetyksestä vuorovaikutuksessa elektronin kanssa on virheellinen ja sanontatapa ”ftonia voidaan tarkastella aaltona” epämääräinen. Aapelin loppukommentti siitä, miten fotonin tarkastelussa käytetään klassisen mekaniikan lakeja viestii ilmeisesti Aapon rakenneosafotonimallista, jossa fotoneja pidetään valon rakenneosina.

### **Elektronin kvanttimalli**

Viljo (opettaja) esitti elektronin ominaisuuksiksi massan, varauksen, liikemäärän ja energian. Hän lisäsi, ettei elektronilla ole tarkkaa rataa, vaan se on tietyllä todennäköisyydellä jollakin paikalla Schrödingerin yhtälön kertoessa sen energian paikan funktiona. Hänen mukaansa elektroni ei ole yksilöityvä, vaan se on pistemäinen olio, jolla ei ole sisäistä rakennetta. Viljo kertoi, että elektronilla on myös de Broglien aallonpituus (aaltoluonne), joka riippuu elektronin liikemäärästä ( $\lambda = h/p$ ). Viljo myös mainitsi elektronin kuuluvan leptoneihin.

Tulkinta. Viljon ilmaisema elektronimalli on tiedollisesti laaja ja suurelta osin opetuksen tavoitteiden mukainen. Hän mainitsi myös Schrödingerin yhtälön ja paikan todennäköisyystulkinnan vastauksessaan.

### **Elektronin esikvanttimalli**

Leevi (opiskelija) määritteli elektronin varaukselliseksi ja massalliseksi hiukkaseksi, jolla on hiukkas- ja aaltoluonne. Leevin mukaan elektronit koostuvat leptoneista. Leevi lisäsi, että elektroni voi irrota metallipinnasta saatuaan fotonin energian, jos ”säteilyn taajuus ylittää rajataajuuden, mikä irrotustyöhön tarvitaan.”

Tulkinta. Leevin elektronimalli luokitui vaatimattomaksi kvanttielektronimalliksi. Se on tiedollisesti melko vaatimaton, mutta ei sisällä minkään klassisen elektronimallin piirteitä.

### **Elektronin hybridimalli**

Lari (opiskelija) määritteli negatiivisesti varatuksi massalliseksi alkeishiukkaseksi, jonka spin on  $\pm 1/2$  eli ”ylös” ja ”alas”. Lari kertoi, että elektroni kuuluu fermioneihin ja noudattaa siten Paulin kieltosääntöä ja Fermi-Dirac statistiikkaa. Larin mukaan elektronin antihiiukkanen on positroni. Lari kertoi elektronin varauksensa tähden säteilevän kiihtyvässä liikkeessä ollessaan ja elektronin ympärillä vaikuttavan sen

synnyttämän sähkökentän. Lopuksi Lari totesi, että elektronilla on aalto- ja hiukkasominaisuuksia.

Tulkinta. Klassista säteilyn syntymekanismia ja kentän muodostumista elektronin ympärille lukuun ottamatta Larin ilmaisema elektronimalli on kvanttimalli. Mainitut ominaisuudet kuuluvat elektronin klassiseen malliin.

### **Elektronin klassinen malli**

Aapeli (opettaja) määritteli elektronin hiukkaseksi, jolla on massa, tietty paikka tietyllä ajanhetkellä, pyörimisestä sekä radallaan että oman akselinsa ympäri seuraava pyörimismäärä ja spin. Hänen mukaansa elektronilla on klassisesta, rakosysteemin avulla havaittavasta, hiukkasesta poiketen aaltoluonne. Elektronia voidaan tarkastella sekä hiukkasena että sen liikkeessä aaltona. Aapelin mielestä elektronin paikan määrittäminen on lähes mahdotonta (Heisenberg). Lopuksi hän toteasi, että yleensä elektronin tarkastelussa käytetään klassisen mekaniikan lakeja, mutta se ei riitä tiettyjen tapahtumien/ilmiöiden tarkastelussa.

Tulkinta. Aapelin elektroniin liittämät ominaisuudet ovat klassisia. Aapeli viittasi elektronin yhteydessä atomin planeettamallin ja elektronin ratoihin sekä klassisen mekaniikan lakien käyttämiseen elektronin tarkastelussa. Hänen viittauksensa aaltoluonteen havaitsemiseen rakosysteemin avulla on epämääräinen, samoin on ilmaisu ”elektronia voidaan tarkastella sen liikkeessä aaltona”. Aapeli mainitsi Heisenbergiin elektronin paikan määrittämisestä mainitessaan, mutta ei vastauksensa perusteella ymmärrä sen merkitystä.

### 5.8.3 Keskeisten tulosten koonti ja merkitys

Lopputestillä mitattuna sekä opettajien että opiskelijoiden kvantti-ilmiöiden ja – käsitteiden ymmärtämisen taso parani kurssin aikana. Ryhmittäinen tarkastelu osoitti, että lukio-opettajat menestyivät lopputestissä hieman paremmin kuin opettajaopiskelijat tai yläkoulussa työskentelevät opettajat. Kvantti-ilmiöistä lopputestissä tarkasteltiin mustan kappaleen säteilyä, jonka hallinta oli sekä opiskelijoiden että opettajien ryhmissä kuitenkin vain tyydyttävää tasoa.

Tarkasteltaessa fotonin ja elektronin kvanttiolioisuuden ymmärtämistä tulokset osoittavat, että vain harvat oppijat omaksuivat ne hyväksyttävällä tavalla. Monet oppijat kuitenkin saavuttivat esiymmärryksen. Yleisimmin oppijoilla esiintynyt ymmärtämisen vaikeus oli elektroniin ja foniiniin liittyvien eri mallien ominaisuuksien yhdistäminen hybridimalliksi.

Tulokset myös osoittavat mustan kappaleen säteilyn oppimisen vaativuutta. Herääkin kysymys, onko ilmiön kuuluminen lukion modernin fysiikan kurssin opetussuunnitelmaan (Opetushallitus 2003) perusteltua ja tarkoituksenmukaista, vai olisiko riittävää tarkastella säteilyn ja materian välisen vuorovaikutuksen kvanttittumista vain valosähköisen ilmiön ja Comptonin ilmiön yhteydessä, jotka ovat käsitteellisesti helpompia. Jos mustan kappaleen säteilyn ilmiön hallinta on vaativaa tuleville opettajille ja työssä oleville opettajille, miten ilmiötä voidaan lähestyä ymmärrettävästi lukiotasolla?

Elektronin ja fotonin kvanttiluonteen ymmärtäminen osoittautui myös vaativaksi tehtäväksi sekä opiskelijoille että opettajille. Kuten aiemmin luvussa 4.3 esitettiin, elektronin ja fotonin kvanttiolioisuuden ymmärtäminen vaatii oppijalta kurssin sisällön, ja erityisesti kvantti-ilmiöiden, kokonaisvaltaista hallintaa. Tämän tavoitteen saavuttamisessa tarvitaan kehittyneitä metakognitiivisia taitoja.

## 5.9 Osallistujien suhtautuminen kurssiin

Opiskelijoiden ja opettajien suhtautumista kurssiin, sen menetelmiin ja opiskeluun kurssilla arvioitiin loppukyselyn avulla. Kysely koostui likert-asteikolla arvioitavista väittämistä, joita oli lisäksi mahdollista kommentoida vapaamuotoisesti.

### 5.9.1 Opiskelumenetelmät

Kurssin kehittämisen kannalta on tärkeää selvittää oppijoiden suhtautumista kurssin menetelmiin. Kurssin opetuksessa eri tyyppisillä tehtävillä oli merkittävä asema, koska tietoa rakennettiin tehtävien kautta. Käytettyjä menetelmiä kuvattiin tarkemmin luvussa 4.1.3 (s. 68).

#### A. Harjoitukset

##### **Opiskelijat**

Opiskelijoista kaksi piti luentojen aikana tehtäviä harjoituksia (taustatehtävät ja tietoa rakentavat tehtävät) hyvinä ja neljä melko hyvinä oman oppimisensa kannalta (taulukko 5.24, s. 210).

**Taulukko 5.24.** Opiskelijoiden kokemukset luentotehtävistä oman oppimisen kannalta.

Opiskelijat (n = 8)	Hyviä	Melko hyviä	Ei hyviä eikä huonoja
Luentotehtävät olivat oman oppimiseni kannalta mielestäni	2	4	2

Esimerkiksi Pertti ja Erkki kokivat luentoharjoitukset hyödyllisiksi.

**Pertti:** Mukavaa vaihtelua perinteisiin kursseihin verrattuna. (...) Hyvää oli se, että kurssilla muutakin kuin vain luentoja.

**Erkki:** Luennoilla olleet harjoitukset olivat hyviä. Niitä joutui miettimään joskus tosissaankin, että sai itsestään ulos järkevää tekstiä.

Opiskelijoista kaksi suhtautui kurssin opetusmenetelmiin neutraalisti. Esko kuvasi palautteessaan luentotehtäviä ”haparoinniksi pimeässä”. Hänen vastauksestaan ei kuitenkaan käy ilmi, mitä hän kommentillaan tarkoitti.

### Opettajat

Opettajista kaksi piti luentotehtäviä (tietoa rakentavat tehtävät) hyvinä ja 11 melko hyvinä oman oppimisensa näkökulmasta (taulukko 5.25). Taustatehtävät arvioi hyviksi kuusi opettajaa ja melko hyviksi kahdeksan opettajaa. Yksi suhtautui luentotehtäviin neutraalisti ja kolme piti niitä joko huonoina tai melko huonoina omaa oppimista ajatellen. Lisäksi kaksi suhtautui taustatehtäviin neutraalisti ja yhden opettajan mielestä ne olivat huonoja omaa oppimista arvioitaessa.

**Taulukko 5.25.** Opettajien kokemukset luento- ja taustatehtävistä oman oppimisen kannalta.

Opettajat (n = 17)	Hyviä	Melko hyviä	Ei hyviä eikä huonoja	Melko huonoja	Huonoja
Luentotehtävät olivat oman oppimiseni kannalta	2	11	1	2	1
Taustatehtävät olivat oman oppimiseni kannalta	6	8	2	1	-

Esimerkiksi Tuomas, Kalevi, Olavi ja Heikki suhtautuivat opetusmenetelmiin myönteisesti:

**Tuomas :** Tehtävät olivat hyviä ja niitä pohtiessa oppi paljon.

**Kalevi:** Kurssi oli mielenkiintoinen ja opetusmenetelmä oli minusta oikein hyvä. Pohdiskellen asiat jäivät paremmin mieleen.

**Olavi:** Hyvää kurssilla oli tausta-, luento- ja kotitehtävät. Niitä tekemällä oppi parhaiten.

**Heikki:** Kurssilla oli hyvää opeteltujen asioiden melko perusteellinen läpikäyminen (taustatehtävät, luento + harjoitusteht.). Oli pakko myös itse paneutua asioihin. Tiedän, että ensi syksynä, kun pidän lukiossa modernin fysiikan kurssia saan selittää ja pystyn selittämään tämän osa-alueen paljon paremmin kuin tähän asti.

Vastaustensa perusteella Tuomas, Kalevi, Olavi ja Heikki ovat oppimisstrategialtaan sellaisia, että he pyrkivät asioiden ymmärtämiseen ja kokevat oppivansa itse pohdiskelemalla.

Viljo piti opetusmenetelmää hyvänä mutta lukio-opiskelijan näkökulmasta työläänä: *”Opetusmenetelmänä varmasti hyvä, mutta kovin työläs. En kyllä raaskisi työllistää oppilaittani näin paljon (muitakin kursseja opiskeltavana).”*

Jorman oppimistyyliin opetusmenetelmä ei sen sijaan sopinut, eikä hän kokenut sitä soveltamiskelpoiseksi koulutasolle: *”Opetusmenetelmä muuttui matkalla, tosin parempaan, mutta on silti opiskelijalle ärsyttävä.”* Jorman oppimistyyliin myöskään luentotehtävät eivät soveltuneet.

**Jorma:** Luentotehtävät olivat lähinnä ahdistavia, tarvitsen jotenkin enemmän aikaa ja tukimateriaalia prosessoidakseni itse (...) huonoa olivat tuntitehtävät, eivät vain sovi minulle.

## B. Kotitehtävät

Kuten taulukko 5.26 (s. 212) osoittaa, kaikki opiskelijat kokivat kotitehtävät melko hyväksi oman oppimisen kannalta. Opettajista 12 piti kotitehtäviä hyvinä ja loput viis melko hyvinä oppimisen näkökulmasta. Eero (opettaja) mainitsi kotitehtävien aikarajat kurssi suorittamisen kannalta hyväksi seikaksi:

**Eero:** ”Ilman kotitehtäviä, jotka oli pakko tehdä tiettyyn päivään mennessä, kurssista ei olisi tullut mitään”.

Opettajien kurssilla sekä tausta- että kotitehtävät oli palautettava tiettyyn päivämäärän mennessä ennen seuraavaa lähiopetusjaksoa, joten Eero tarkoittaa kotitehtävillä luultavasti sekä tausta- että kotitehtäviä.

**Taulukko 5.26.** Opiskelijoiden ja opettajien kokemukset kotitehtävistä oman oppimisen kannalta.

Kotitehtävät olivat oman oppimiseni kannalta	Hyviä	Melko hyviä
Opiskelijat (n = 8)	-	8
Opettajat (n = 17)	12	5
Yhteensä	12	13

### 5.9.2 Kurssin vaativuustaso

Jotta oppiminen olisi mielekästä, opetuksen sisällön tulisi tarjota oppimiselle haasteita. Mikäli opetuksen sisältöjen ja oppijoiden aiemman tiedon välinen kuilu on liian suuri, oppija voi kokea turhautuneisuuden tunteita. Samoin voi käydä, mikäli opiskeltava aines on oppijalle jo entuudestaan tuttua. Onkin tärkeää selvittää, millaisena eri opetusryhmät kokivat kurssin ja sen osa-alueiden vaativuustason.

#### A. Kurssi yleisesti

Opiskelijoista puolet piti kurssia ei helppona eikä vaativana ja kaksi melko helppona ja kaksi melko vaativana (taulukko 5.27).

Opettajista enemmistö, 14 seitsemästätoista kyselyyn vastanneesta, piti kurssia melko vaativana. Kaksi opettajaa piti kurssia vaativana, ja yksi ei vaativana eikä helppona.

**Taulukko 5.27.** Kurssin vaativuustason kokeminen opiskelijoiden ja opettajien ryhmissä.

Kurssi oli mielestäni	Vaativa	Melko vaativa	Ei vaativa eikä helppo	Melko helppo
Opiskelijat (n = 8)	-	2	4	2
Opettajat (n = 17)	2	14	1	-
Yhteensä	2	16	5	2



## B. Tausta- ja luentotehtävät

Opiskelijoiden kurssilla myös taustatehtäviä pohdittiin pienryhmissä luentoaikana, joten niitä ja varsinaisia uutta tietoa rakentavia tehtäviä käsitteli vain yksi väittämä opetusryhmän palautekyselyssä. Viisi opiskelijaa piti luentotehtäviä melko vaativina tai vaativina ja yksi suhtautui niihin neutraalisti. Kaksi opiskelijaa sen sijaan piti niitä melko helppoina (taulukko 5.28).

**Taulukko 5.28.** Opiskelijoiden kokemukset tausta- ja luentotehtävien vaativuustasosta.

Opiskelijat (n = 8)	Vaativia	Melko vaativia	Ei vaativia eikä helppoja	Melko helppoja
Luento- ja taustatehtävät olivat mielestäni	1	4	1	2

Opettajien ryhmässä noin kaksi kolmasosaa koki käsiteltävää aihetta pohjustavat taustatehtävät vaativiksi tai melko vaativiksi (taulukko 5.29). Loput opettajat suhtautuivat tehtäviin neutraalisti. Tilanne on oleellisesti sama luentotehtävien tapauksessa.

**Taulukko 5.29.** Opettajien kokemukset tausta- ja luentotehtävien vaativuustasosta.

Opettajat (n = 17)	Vaativia	Melko vaativia	Ei vaativia eikä helppoja
Taustatehtävät olivat mielestäni	1	10	6
Luentotehtävät olivat mielestäni	2	9	6

## C. Kotitehtävät

Suhtautuminen sekä perinteisiä harjoitustehtäviä että sanallisia tehtäviä sisältäneisiin harjoitustehtäviin (taulukossa selvyuden vuoksi nimetty kotitehtäviksi) poikkesi toisistaan opiskelijoiden ja opettajien opetusryhmissä. Suurin osa opiskelijoista piti

tehtäviä melko helppoina, kun taas opettajista suurin osa piti niitä melko vaativina tai vaativina (taulukko 5.30).

**Taulukko 5.30.** Opiskelijoiden ja opettajien kokemukset kotitehtävien vaativuustasosta.

Kotitehtävät olivat mielestäni	Vaativia	Melko vaativia	Ei vaativia eikä helppoja	Melko helppoja
Opiskelijat (n = 8)	-	-	3	5
Opettajat (n = 17)	2	9	5	1
Yhteensä	2	9	8	6

Unto (opettaja) kommentoi kotitehtäviä seuraavasti: *”Kyllä ne kotona tehtävät välillä aikaa veivät, mutta toisaalta niiden kautta pääsi jotenkin asiaan paremmin sisälle jo ennalta, ja taustatehtävien tekemisestä oli usein hyötyä kotitehtäviä ajatellen.”*

Timon (opettaja) mukaan kotitehtävät eivät olleet vaativia eikä helppoja. Kyselyssä hän reflektoi omaa suoriutumistaan: *”Ehken paneutunut kotitehtäviin täysillä.”*

Tuomaan (opettaja) mielestä kotitehtävien taso vaihteli: *”Osa oli helpohkoja mutta suurin osa oli vaativia.”* Kokonaisuutena Tuomas arvioi tehtävät melko vaativiksi.

### 5.9.3 Kurssin antamat valmiudet

Valtaosa opiskelijoista koki saaneensa kurssilla valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita (taulukko 5.31, s. 215), kuten Leevi ja Lauri:

**Leevi** (opiskelija): Kurssista oli tehty ymmärrettävä ja inhimillinen, siis suunnattu opettajille eikä teoretikoille.

**Lauri** (opiskelija): Hyvää oli rento ja rakentava ilmapiiri, sekä asioiden ymmärtämisen painottaminen.

Vain kaksi opettajaa vastasi aihetta käsittelevään väittämään kielteisesti. Heistä toinen, Jorma, kommentoi väittämää seuraavasti:

**Jorma** (opettaja): ”Omaa panostusta olisi vaadittu enemmän kuin minulla nyt oli mahdollista ajallisesti (työ, perhe) = siis ei johdu kurssista vaan itsestäni. Huomasin myös että en ole kovin motivoitunut, sillä opetan peruskoulussa.”

Mainittakoon, että Jorman lopputestin tulos oli hyvin heikko. Myöskin perusasteella opettava Eero (opettaja) kommentoi kurssin sisältöjä yläkoulun opetussuunnitelman näkökulmasta:

**Eero** (opettaja): ”Peruskoulussa ei näitä aiheita käsitellä. Hiukkasseikkailu-sivuston asiat jota voi käyttää, samoin atomin rakenteen kehittymisen vaiheet.”

Eero oli kuitenkin mielestään saanut kurssilla modernin fysiikan aiheiden ymmärtämiseen tarvittavia valmiuksia. Eeron omaa arvioita tukee myös erinomainen menestyminen lopputestissä.

**Taulukko 5.31.** Suhtautuminen väittämään ”Kurssi antoi minulle valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita” ryhmittäin.

Kurssi antoi minulle valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita	Samaa mieltä	Melko samaa mieltä	Ei samaa eikä eri mieltä	Melko eri mieltä
Opiskelijat (n = 8)	6	1	1	-
Opettajat (n = 17)	6	8	1	2
Yhteensä	12	9	2	2

#### 5.9.4 Tulosten koonti

Sekä opiskelijat että opettajat suhtautuivat kurssin opiskelumenetelmiin myönteisesti. Suurin osa opiskelijoista piti aihetta valmistavia taustatehtäviä ja tietoa rakentavia luentotehtäviä sekä kotitehtäviä melko hyvinä oppimisen näkökulmasta tarkasteltaessa. Opettajista suurin osa piti tausta- ja luentotehtäviä melko hyvinä. Kotitehtävät suurin osa opettajista koki hyväksi omaa oppimistaan arvioidessaan.

Kiitosta opiskelijoilta sai esimerkiksi opetuksen vaihtelevuus ja tehtävissä vaadittava pohdinta. Myös monet opettajat mainitsivat omakohtaisen pohtimisen tärkeyden oppimisessa. Osa opettajista koki erilaisten tehtävien varaan rakentuvan opetuksen positiivisessa mielessä pakottavan perehtymään opiskeltavaan asiaan. Negatiivisina seikkoina mainittiin muun muassa opetusmenetelmän työläys. Pieni osa opettajista ei pitänyt opetusmenetelmästä lainkaan. Luonnollisesti oppijat poikkeavat

toisistaan oppimistyyleiltään. Uudenlaiset menetelmät voivat myös aiheuttaa alussa muutosvastarintaa. Tulos osoittaa, että oppijalähtöisten menetelmien käyttö on oppijoiden näkökulmasta hyödyllistä.

Enemmistö opiskelijoista ei pitänyt kurssia vaativana eikä helppona. Eri tyyppisiä tehtäviä suurin osa opiskelijoista piti melko helppoina. Opettajista sen sijaan enemmistö piti kurssia melko vaativana, kuten myös kurssin tehtäviä. Vaikuttaa siltä, että osallistujien kokemustustojen mukaan kurssi koettiin eri tavoin.

Sekä opiskelijat että opettajat kokivat saaneensa kurssilla valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita. Tulos on kannustava ja osoittaa, että kurssin opetuksessa onnistuttiin synnyttämään myönteisiä oppimiskokemuksia.

## LUKU VI

### Pohdinta ja arviointi

#### 6.1 Tutkimustulosten pohdinta

##### 6.1.1 Oppijoiden kvantti-ilmiöitä kuvaavat mallit

Kvantti-ilmiöt olivat tapausopiskelijoille kurssin alussa melko vieraita valosähköistä ilmiötä lukuun ottamatta. Tapausopettajat sen sijaan tunsivat kvantti-ilmiöt entuudestaan ja olivat myös niitä opettaneet. Tulosten mukaan oppijoiden peruskäsitteiden, kuten absorption ja emission, selittämiseen käyttämät mallit antoivat suuntaviivat sille, miten oppijat selittivät kvantti-ilmiöitä kurssin aikana. Mikäli oppijan peruskäsitteiden hallinnassa oli puutteita tai jäsentymättömyyttä, saattoi se indikoida oppimisen vaikeuksia kurssin aikana. Yleisesti voidaan todeta, että oppijat eivät käyttäneet jäsenyneesti ja johdonmukaisesti eri tieteellisiä malleja, vaan näiden mallit muodostuivat useiden erillisten mallien ominaisuuksista; ne olivat niin sanottuja hybridimalleja.

Eräs oppijoiden malleissa vahvasti mukana oleva malli oli historiallinen säteilyn rakenneosamalli, jossa valon ajatellaan koostuvan valohiukkasista, fotoneista, jotka etenevät suoraviivaisia ratoja pitkin<sup>56</sup>. Kaikki tutkittavat henkilöt sovelsivat rakenneosamallin piirteitä kvantti-ilmiöiden selittämiseen ainakin jossain tutkimuksen vaiheessa. Rakenneosamallista luopuminen oli oppijoille vaikeaa, ja sen soveltaminen vaikeutti sekä kvantti-ilmiöiden että fotonin kvanttiolioisuuden ymmärtämistä. Vain yksi tapausoppijoista tiedosti rakenneosamallin problematiikan ja onnistui lopputestin tulosten perusteella melko hyvin luopumaan sen soveltamisesta.

Mallin epärelevantti soveltaminen saattoi johtua myös siitä, että oppija ei ymmärtänyt mallin ja todellisuuden välistä suhdetta, eikä mallin episteemistä asemaa (Harré 1970). Säteil Kentän ja materian välistä vuorovaikutusta kuvaavat mallit perustuvat usein klassisille malleille ja käsitteille. Lisäksi visuaaliset mallit, joissa säteilykentän ja materian välistä vuorovaikutusta kuvataan fotonin ja elektronin välisinä törmäyksinä, ovat oppijalle ilmeisen helposti omaksuttavia. Tässä tutkimuksessa

---

<sup>56</sup>Fysiikan näkökulmasta säteilykenttää voidaan kuitenkin kuvata klassisten sähkömagnetismin avulla soveltamalla vain materian ja säteilykentän väliselle vuorovaikutukselle kvanttiehtoja, joille fotonin käsite rakentuu.

tällaisia malleja ovat esimerkiksi Comptonin ilmiön yhteydessä käytettävä kimmoisan törmäyksen malli ja valosähköisen ilmiön malli, jossa fotonit irrottavat elektroneja osuessaan metallin pintaan. Tutkimuksen tulosten mukaan osa oppijoista pystyi esittämään kyseiset mallit, vaikka eivät pystyneet selittämään ilmiötä. Toiset oppijat sen sijaan vaikuttivat ajattelevan, että mallit kuvaavat konkreettisesti tarkasteltavaa ilmiötä, eivätkä ymmärtäneet sen analogisuutta.

Comptonin ilmiön ja valosähköisen ilmiön malleissa on kuitenkin myös sellaisia piirteitä, joita ei voida fysiikan näkökulmasta siirtää kohteen ominaisuuksiksi. Näitä ovat esimerkiksi elektronin ja fotonin kuvaaminen kappalemaisiksi pallomaisia symboleita käyttäen, fotonin ja elektronin eteneminen suoraviivaisia ratoja pitkin<sup>57</sup> ja elektronin ja fotonin osuminen tai törmääminen toisiinsa. Mainitut mallien ominaisuudet ovat yhteensopivia säteilyn rakenneosamallin piirteiden kanssa, joten oppijan soveltama säteilyn rakenneosamalli saa vahvistusta, jolloin siitä luopuminen tulee entistä vaikeammaksi.

Mustan kappaleen säteilyn ymmärtäminen on oppijoille valosähköistä ilmiötä tai Comptonin ilmiötä kompleksisempaa kaiketi ilmiön tulkintaan tarvittavien lukuisten mallien ja periaatteiden hallinnan vuoksi. Jo itse mustan kappaleen käsitteen malliluonteen ymmärtäminen tuotti ongelmia opiskelijoille ja opettajille. Tutkimukseen osallistujat esimerkiksi ajattelivat mustan kappaleen olevan myös väriltään musta, tai eivät ymmärtäneet mustan kappaleen käsitteen idealisaatiomalliluonteen merkitystä. Idealisäteilijän määritelmä saattoi lisäksi luoda illuusion tyydyttävästä ymmärryksestä, jolloin oppijan mustan kappaleen säteilyn ymmärtäminen ei tältä osin juurikaan kehittynyt kurssin aikana. Opiskelijoilla ymmärtämisen ongelmia tuotti säteilyn rakenneosamallin virheellinen soveltaminen mustan kappaleen säteilyyn, mutta opettajilla rakenneosamallin soveltamista ei ilmennyt mustan kappaleen säteilyn yhteydessä.

Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että kehittyneet metakognitiiviset taidot tukivat kvantti-ilmiöiden oppimista, samoin kuin opetuksen aktiivinen seuraaminen. Oppimistyyliiltään pohdiskelevat tapausoppijat saavuttivat paremmat tulokset kuin ne tapausoppijat, jotka eivät panostaneet kurssiin kovin paljon, eivätkä seuranneet sitä aktiivisesti.

---

<sup>57</sup> Klassisen hiukkasantologian rata-käsitys.

## 6.1.2 Oppijoiden kvanttiolioita kuvaavat mallit

### A. Elektronia kuvaavat mallit ja ominaisuudet

Elektronin aaltoluonteen ymmärtäminen osoittautui vaikeaksi sekä opettajille että opiskelijoille. Esimerkiksi aaltomallin, aaltoluonteen ja dualismin käsitteiden ymmärtämisessä esiintyi ymmärtämisen ongelmia. Lisäksi Bornin todennäköisyystulkinta ja Heisenbergin epätarkkuusperiaate esiintyivät tapausoppijoiden puheessa vain epämääräisesti. On kuitenkin muistettava, ettei kvanttiolioiden epistemologia ollut tämän tutkimuksen varsinainen kiinnostuksen kohde, vaan juuri ontologia.

Oppijoiden elektronin liikkeen kuvailuun käyttämät mallit jäivät ensimmäisen asteen mallien, semiklassisten de Broglien mallien tasolle, kun Schrödingerin yhtälöä ja Bornin tulkintaa voidaan pitää toisen asteen malleina ja aidommin kvanttimalleina. Näiden abstraktiudeltaan vaativampien mallien oppiminen on haasteellista. On kuitenkin muistettava, että lukiotasolla elektronin liikkeen mallit jäävät juuri de Broglien mallien tasolle (Opetushallitus 2003).

Elektronin kuvaamiseksi oppijat usein käyttivät klassisen sähkömagnetismin malleja liittäen näiden mallien ominaisuuksista elektronin ominaisuuksiksi esimerkiksi klassiset energian ja liikemäärän käsitteet, elektronien vaellusnopeuden, paikallisuuden tai etenemissuunnan. Tämä on eräs tekijä elektronin kvanttiolioisuuden oppimisen vaikeuksien taustalla. Sekä lukio- että fysiikan cum laude -opinnoissa elektronia käsitellään usein sähkömagnetismin teorioiden opetuksen yhteydessä, jolloin sen kvanttiluonne ei tule esille. Esimerkiksi tarkastellessa elektronia sähkökentässä käytetään visuaalisia malleja, joissa elektroni näyttäytyy kappalemaisena, yksilöityvänä oliona. Loppujen lopuksi myös elektronin kvanttiolioisuuden ymmärtämisen vaikeudet näyttävät kulminoituvan mallien, niiden pätevyysalueiden, lähteestä kohteeseen siirtyvien ominaisuuksien ja mallien episteemisen aseman ymmärtämisen ongelmiin.

Elektronia kuvaavien klassisten mallien lisäksi sen massallisuus luo lisäksi mielikuvan elektronin konkreettisuudesta huolimatta siitä, että elektronin massa on äärimmäisen pieni. Lisäksi kemian opinnoissa elektronia ja fonia tarkastellaan hieman eri näkökulmasta kuin fysiikassa, mikä voi osaltaan vaikeuttaa eri mallien ymmärtämistä erillisiksi malleiksi. Myös elektronin havaitsemisen ymmärtäminen tuotti oppijoille vaikeuksia; osa oppijoista jopa ajatteli elektronien suoran havaitsemisen mahdolliseksi.

Ontologisten kategorioiden näkökulmasta vaikuttaa siltä, että oppijan on vaikea ymmärtää elektroni kuuluvaksi kvanttiolioiden kategoriaan klassisten hiukkasten kategorian asemasta. Tutkituilla oppijoilla elektroni kuului ominaisuuksiensa perusteella samanaikaisesti molempiin kategorioihin, koska oppijat liittivät elektroniin

sellaisia klassisen hiukkasen ominaisuuksia, kuten rata tai kappalemaisuus, joita sillä ei fysiikan näkökulmasta ole. Näiden hiukkasmallien ominaisuuksien lakkauttaminen elektronin tapauksessa on oppijalle vaativaa, koska lukuisat klassiset mallit tukevat mielikuvaa niistä.

## B. Fotonia kuvaavat mallit ja ominaisuudet

Tulosten mukaan oppijat tietävät fotonin lepomassattomaksi ja varauksettomaksi olioksi. Fotonin havaitseminen sen sijaan on ongelmallista. Osa oppijoista ajatteli, että fotoneja voidaan havaita kun havaitaan valoa. Tulosten mukaan oppijat kuvasivat useimmiten fotonia säteilyn rakenneosamallin avulla. Tämä puolestaan vaikeutti fotonin kvanttiolioisuuden oppimista.

Kurssin kvantti-ilmiöiden tulkinnoissa materian ja säteilykentän välistä vuorovaikusta tulkittiin elektronin ja fotonin välisinä hetkellisinä ja paikallisina vuorovaikutustapahtumina, joissa kyseiset kvanttioliot ilmenevät. Kurssin opetusmalli fotonin hetkellisestä ja paikallisesta eksistenssistä säteilyn ja materian välisissä vuorovaikutustapahtumissa johti ristiriitaan säteilyn rakenneosamallin oletusten kanssa. Fotonin ymmärtäminen kentän tilaa kuvaavaksi olioksi, joka välittää energiaa, pyörimismäärää ja liikemäärää vuorovaikutuksessa, oli oppijalle vaikeaa, mikäli oppija ajatteli fotonin kuljettavan energiaa säteilyssä. Rakenneosamallissa oppija liitti fotonin myös radan, paikan determinismin ja jatkuvan eksistenssin. Pahimmillaan rakenneosamalli johti oppijan päättelyketjuun: valo on aaltoliikettä tai tasoaaltoja ja valo koostuu fotoneista, joten fotonit ovat aaltoliikettä tai tasoaaltoja.

Aalto-hiukkasdualismin ymmärtäminen on keskeisessä asemassa fotonin ja elektronin luonteen ymmärtämisessä. Oppijoilla esiintyi sekä naiivia dualismi-käsitystä, jonka mukaan valo on sekä hiukkasia että aaltoja, mutta myös tieteellisesti hyväksyttävää mallintavaa käsitystä, jonka mukaan olioiden käyttäytyminen voidaan tulkita hiukkasmallin tai aaltomallin avulla riippuen tarkasteltavasta ilmiöstä. Viime kädessä tässäkin tapauksessa on siten kyse mallien luonteen ymmärtämisestä.

Myös fotonin historialliset edeltäjät, valokvantti ja säteilykvantti, vaikeuttivat fotonin ymmärtämistä, sillä oppija ei miellä niitä automaattisesti fotonin synonyymeiksi, vaikka kyseessä on fotoni-olion kuvaamiseen käytettyjen mallien käsitteellinen kehittyminen (ks. esimerkiksi Kidd ym. 1989). Esimerkiksi tapausopiskelija Aapon omaksuma fotonin epätäsmällinen määritelmä sähkömagneettisen säteilyn välittäjähiukkasena aiheutti ymmärtämisen vaikeuksia, kun hän yritti verrata fotonia muiden perusvuorovaikutusten välittäjiin ja säteilyn rakenneosamallin piirteisiin.

Eräs esille tullut fotonin kvanttiolioisuuden oppimisen ongelmakohta on fotonin massa-ominaisuus. Monet tutkimukseen osallistuneet kertoivat liikemassan fotonin



ominaisuudeksi. Käsitys vaikeutti esimerkiksi oppijoiden Comptonin ilmiön ymmärtämistä, joka verifioi fotonin suuntautuneen liikemäärän. Oppijan näkökulmasta fotonin liikemäärä ei kuitenkaan vaikuta erityisen merkittävältä seikalta johtuen ilmeisesti juuri kimmoisan törmäyksen mallista, jossa sironneen olion liikemäärällisyys on itsestään selvä tekijä.

Huolimatta siitä, että opiskelijat kokevat fotonin elektronia mystisemmäksi olioksi, ja täten enemmän kvanttiolioksi kuin elektronin, myös fotonin kuuluu opiskelijoiden ontologisissa kategorioissa sekä kvanttiolioiden että klassisten hiukkasten, tai jopa aaltojen, ontologisiin kategorioihin. Mielikuvaa fotonin liittyvistä klassisen hiukkasmallin ominaisuuksista, kuten rata tai kappalemaisuus, tukee esimerkiksi historiallinen säteilyn rakenneosamalli, joka on luonteeltaan hyvin pysyvä oppijan ajattelussa. Fotonin siirtäminen uuteen ontologiseen kategoriaan on oppijalle vaativa prosessi, johon kognitiivinen ristiriitatilannekaan ei välttämättä johda, kuten Tuomaan oppimisprosessikuvaus osoitti.

### 6.1.3 Oppijoiden suhtautuminen kurssiin

Yleisellä tasolla voidaan todeta, että sekä opiskelijoiden että opettajien suhtautuminen kurssiin ja sen menetelmiin oli myönteistä. Opettajaopiskelijat arvostivat esimerkiksi pohdintatehtäviä ja opetuksen vaihtelevuutta. Muutosvastarintaa uutta opetustapaa kohtaan ei juurikaan esiintynyt, vaikka kurssi menetelmineen poikkeaa huomattavasti perinteisistä Joensuun fysiikan laitoksen kursseista.

Opettajilta tehtävien varaan rakentuva opetus sai sekä kiitosta että moitetta: opetusmenetelmän koettiin positiivisessa mielessä pakottavan perehtymään opiskeltaviin aiheisiin, mutta siinä pidettiin myös työläänä. Myös monet opettajat mainitsivat omakohtaisen pohtimisen tärkeyden oppimisessa.

Kurssin opetusmenetelmiä koskevat tulokset ovat rohkaisevia ja kannustavat jatkamaan oppijalähtöisten opetusmenetelmien käyttöä kurssin opetuksessa. Oppijoita aktivoivien pohdintatehtävien saama myönteinen palaute olisi suositeltavaa huomioida myös muiden fysiikan kurssien opetuksessa.

Opiskelijoiden mielestä kurssi ei ollut vaativa eikä helppo, ja tehtävät olivat heistä melko helppoja. Opettajien mukaan sitä vastoin kurssi yleisesti käytettyine tehtävineen oli melko vaativa. Opiskelijoiden ja opettajien poikkeava suhtautuminen kurssiin ja käytettyjen tehtävien vaativuuteen herättää kysymyksiä. Ensinnäkin opiskelijoiden ryhmä oli oppija-ainekseltaan huomattavasti homogeenisempi kuin opettajien ryhmä, jossa oli työkokemukseltaan vaihtelevia eri oppilaitoksissa työskenteleviä opettajia. Luonnollisesti kurssin vaikeuden kokeminen riippuu vastaajan henkilökohtaisista lähtökohdista. Opiskelijoiden ja opettajien menestymistä kurssin lopputestissä verrattaessa havaittiin, että opettajat menestyivät testissä hieman opiskelijoita

paremmin. Herää kysymys siitä, miten vastaajat ovat ymmärtäneet kysymyksessä esiintyvän vaativuuden käsitteen. Lehtisen ja Kuusisen (2001) mukaan epärealistinen tulkinta suoritettavien tehtävien helppoudesta voi johtaa helposti pinnalliseen opiskeluun ja liian lyhyen ajan varaamiseen niiden suorittamiseen.

Sekä opiskelijat että opettajat kokivat saaneensa kurssilla valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita. Tulos on kannustava ja osoittaa, että kurssin opetuksessa onnistuttiin synnyttämään myönteisiä oppimiskokemuksia. On kuitenkin muistettava, että opiskelijoiden ja opettajien kokemustaustat - ja jopa oppimiskäsitys - ovat erilaiset.

## 6.2 Tutkimuksen laadun tarkastelu

Käsillä olevassa tutkimuksessa on sitouduttu konstruktivistiseen paradigmaan, joka määrää myös tutkimuksen laadun arviointiin käytettävän kriteeristön. Tutkimuksen laadun arviointia käsiteltiin jo luvussa III, jossa esitettiin laadullisen tutkimuksen metodologisen ja analyyttisen luotettavuuden kriteerit sekä kriteeristö haastattelututkimuksen arvioinnille tutkimuksen laaduntarkkailuprosessina. Tutkimuksessa tehtyjä ratkaisuja on perustelu tutkimuksen laadun näkökulmasta jo tutkimusraportin eri osissa.

### 6.2.1 Metodologinen ja analyyttinen luotettavuus

#### A. Vastaavuus

Vastaavuuden kriteeri toteutuu, kun tutkimuksessa muodostetut konstruktiot vastaavat haastattavien todellisuuden konstruktioita (Guba 1990). Aineisto on aitoa, kun se käsittelee tutkijan ja tutkittavan näkökulmasta samaa asiaa (Syrjälä ym. 1995). Tässä tutkimuksessa aineistona käytettiin sekä kirjallista materiaalia, joka muodostui pääosin esi- ja lopputesteistä ja palautekyselystä, että tapaustutkimusopiskelijoiden ja -opettajien haastatteluista, jotka myös oli litteroitu kirjalliseen muotoon.

#### **Esi- ja lopputestit sekä palautekysely**

Esitestien ja lopputestien osalta aineiston vastaavuutta voidaan arvioida sen mukaan, ovatko saadut vastaukset relevantteja. Esitestin vastaavuuteen kiinnitettiin huomiota jo sen suunnitteluvaiheessa miettimällä kysymysten muotoiluja huolellisesti, käyttämällä tutkijatriangulaatiota ja testaamalla esitesti sekä koeryhmän että koehenkilön avulla. Koehenkilöä haastateltiin, jotta voitiin varmistua siitä, että tämä oli ymmärtänyt kysymykset oikein, ja siitä, että tutkija ymmärtää koehenkilön vastaukset siten, kuinka

hän on ne tarkoittanut ymmärrettäväksi. Esitestauksen perusteella vaikutti siltä, että esitestin kysymykset ovat ymmärrettäviä ja yksiselitteisiä.

Ensimmäisen opetusryhmän eli opettajaopiskelijoiden esitestin tulokset olivat kuitenkin melko heikot, ja vastaamatta jätettyjä kohtia esiintyi verrattain paljon. Tapausopiskelijoiden haastattelut kuitenkin osoittivat, että haasteltavat opiskelijat olivat ymmärtäneet kysymykset, mutta eivät olleet osanneet vastata niihin. Toisen opetusryhmän eli opettajien testaamista varten esitestin joidenkin kysymysten näkökulmia hieman muutettiin ensimmäisestä ryhmästä saatujen kokemusten perusteella. Myös esitestin toinen versio osoittautui tapausopettajien haastattelujen perusteella aitouden kriteerin toteuttavaksi.

Loppuestiä ei testattu etukäteen koeryhmällä tai henkilöllä, mutta sen suunnittelussa käytettiin tutkijatriangulaatiota kuten myös esitestin suunnittelussa. Opiskelijoiden ja opettajien ryhmien loppuestien kysymykset olivat valtaosin samat. Osallistujien vastausten perusteella voidaan todeta, että loppuestien kysymykset vaikuttivat melko yksiselitteisiltä ja vain harvoin väärin ymmärretyiltä.

Palautekyselyyn saatujen vastausten aitoutta varmistettiin haastatteleamalla tapausopiskelijoita ja -opettajia kyselyssä esiintyneistä aiheista. Joidenkin tutkimukseen osallistuneiden henkilöiden kohdalla näkemykset olivat hieman muuttuneet kyselyyn vastaamisen jälkeen. Palautekyselyn vastausten tulokinnassa on myös syytä olla varovainen osallistujien erilaisista taustojen ja erityisesti oppimiskäsitysten vuoksi.

### **Haastattelut**

Haastattelut toimivat menetelmätriangulaationa tapausopiskelijoiden ja -opettajien esi- ja loppuestien osalta. Niiden avulla voitiin varmistua esi- ja loppuestien vastausten tulkinnoista ja saada esitestiä syvällisempää, monipuolisempaa ja tarkempaa tietoa oppijoiden ajattelusta.

Haastattelujen laatuun vaikuttavat useat eri tekijät. Haastattelutilanne on sosiaalinen vuorovaikutustapahtuma tutkijan ja tutkittavan välillä, joten haastatteluilmapiiri on tärkeä tekijä haastattelujen onnistumisessa. Tässä raportoitavien tapaustutkimusopiskelijoiden ja -opettajien kohdalla haastattelutilanteet olivat tutkijan näkökulmasta onnistuneita, ja tutkittavat vaikuttivat halukkailta kertomaan omista ajatusmalleistaan.

Haastattelututkimuksen laadun kriteerinä pidetään myös sitä, että kertovatko haastateltavat aidosti sen, miten ajattelevat tarkasteltavien asioiden olevan, vai kertovatko he sen, mitä olettavat haastattelijan haluavan heidän kertovan. Tässä tutkimuksessa tätä ongelmaa ei ollut, koska haastattelut tarkastelivat fysiikan käsitteiden ja ilmiöiden ymmärtämistä: haastateltavat pyrkivät kertomaan aidosti, totuudenmukaisesti, ja mahdollisimman oikeellisesti sen, miten he aiheet ymmärtävät. Vaikutti myös siltä, että haastateltavat harvoin ujostelivat omien näkemystensä

esittämistä, vaikka saattoivatkin olla niistä epävarmoja. Harvoin haastattelussa ajaututtiin umpikujaan, jolloin haastateltava sanoi, ettei pysty kertomaan kysyttävästä asiasta mitään.

## B. Siirrettävyys

Laadullisen tutkimuksen siirrettävyys riippuu siitä, miten hyvin tutkittu ympäristö ja sovellusympäristö vastaavat toisiaan. Koska tutkija ei tunne sovellusympäristöjä, jää vastuu tutkimustulosten siirrettävyydestä tulosten soveltajalle. Jotta tulosten soveltaminen olisi mahdollista, tutkijan on kuvattava tutkimusaineisto ja itse tutkimus niin hyvin, että tulosten soveltaminen on mahdollista. (Lincoln & Guba 1985; Tynjälä 1991)

Tässä tutkimuksessa on pyritty kuvaamaan tutkimusaineistoa laajasti ja monipuolisesti. Tulosten keskeisimmän osan muodostavat tapausopiskelijoiden ja -opettajien haastatteluihin perustuvat oppimisprosessikuvaukset, joissa tutkimusaineistoa – haastateltavien litteroitua puhetta – on kuvattu lyhyiden narratiivien sekä autenttisten näytteiden muodossa. Kunkin haastattelun aiheen aineiston jälkeen on esitetty aineistosta tehty fysiikan teoriaan nojaava tulkinta, jotta lukija, tai tulosten soveltaja, voi arvioida tehdyn tulkinnan hyvyden ja sen siirrettävyyden toiseen kontekstiin. Esitettiin ja lopputettiin vastaustyyppit tulevat esille autenttisten näytteiden kautta, joiden yhteydessä esitetään myös niiden tulkinnat ja luokittelun perusteet. Tutkimuksen aihepiirin vaativuuden ja tarkastelujen oppijoiden käsitysten analyysin hienojakoisuuden vuoksi tutkijatriangulaation käyttö olisi ollut mahdotonta.

## C. Tutkimustilanteen arviointi

Tutkimuksen toteutuksessa, haastattelijassa, tutkittavassa ilmiössä ja olosuhteissa tapahtuvat muutokset voivat vaikuttaa haastattelun tuloksiin. Joskus haastattelutilanne voi toimia myös tiedostusprosessina, joka saa aikaan haastateltavan vastausten muuttumisen. (Tynjälä 1991) Tämä huomioitiin tässä tutkimuksessa siten, että tietyistä aiheista esihaastateltiin kahdesti ennen opetusta ja kahdesti sen jälkeen, jotta voidaan havaita mikäli haastattelu innoitti oppijoita opiskelemaan haastatteluissa käsitellyjä aiheita omatoimisesti tai täydentämään haastattelussa tiedostamia puutteita tiedoissaan. Samoin haastattelujen alussa haastateltavilta kysyttiin, ovatko he valmistautuneet haastatteluun. Luonnollisesti omatoiminen opiskelu, asioiden mieleen palauttaminen ja niiden kertaaminen ovat oppimisen ja ymmärtämisen kannalta suositeltavia seikkoja. Osallistujille kuitenkin kerrottiin, ettei haastatteluihin tarvitse valmistautua ja kurssilla he voivat käyttäytyä kuten he yleensä kurseja suorittaessaan tekevät. Raportoitavaksi valituilla tapausopettajilla ja -opiskelijoilla tätä ei niin sanottua

motivaatioefektiä havaittu, mutta osalla raportoinnin ulkopuolelle jääneistä tapauksista se esiintyi vahvana. Myös raportoidut viivästetysti haastatellut opiskelijat kielsivät kerranneensa kurssin aiheita haastatteluja varten, vaikka esimerkiksi eräs raportoinnin ulkopuolelle jäänyt tapaus tunnusti lueskellessaan kurssimateriaalia ”vähän teeveetä katsellessa”.

#### D. Vahvistettavuus

Laadullisella tutkimuksella ei voida tavoitella absoluuttisen objektiivista tietoa, vaan näkökulmia tutkittavaan ilmiöön. Tutkijan omat lähtökohdat voivat vaikuttaa tutkimustyöhön ja ne on kuvattava tutkimuksessa, jotta lukija pystyy ne huomioimaan. (Tynjälä 1991) Pattonin (1990) suositusten mukaan kaikki tutkijaan liittyvä henkilökohtainen ja ammatillinen tieto, joka voi vaikuttaa tutkimusaineiston keräämiseen, analyysiin ja tulkintaan, on tuotava eksplisiittisesti esille.

Tässä tutkimuksessa tutkijan lähtökohtia on kuvattu luvussa I ja myös muissa luvuissa epäsuoremmin. Toimiminen sekä opettajan että tutkijan roolissa, herätti keskustelua osallistuessani Eseran kesäkouluun vuonna 2003. Tuolloin professori Graga Carvalho piti sitä ongelmallisena kehottaen tuomaan kaksoisroolissa toimimisen raportoinnissa eksplisiittisesti esille. Itse en kokenut tätä kaksoisroolia ongelmalliseksi, päin vastoin. Toisaalta tämän kaltainen käytäntö oli ainoa vaihtoehto tutkimuksen toteutukselle tässä muodossa. Suunnitellun kurssiformaatin ja sen ideologian siirtäminen toisen henkilön toteutettavaksi olisi tehnyt tutkimuksesta kompleksisemmän eikä olisi ollut mahdollista tässä aikataulussa. Koska olin itse opettanut aiheet, tiesin miten ne oli opetettu. Mikäli olisin kouluttanut toisen henkilön kurssia luennoimaan, olisi minun pitänyt osallistua opetukseen ja analysoida sen sisällöt, jotta osallistujien esille tuomien mallien tarkastelu toteutetun opetuksen näkökulmasta olisi ollut mahdollista.

Haastattelujen tekeminen hyödytti opettamista, koska sain muun muassa tietoa oppijoiden vaihtoehtoisista käsityksistä ja ajattelun malleista sekä osallistujien palauttamien tehtävien että haastattelujen kautta, ja tätä tietoa pystyin hyödyntämään kurssien opetuksessa. Luonnollisesti se, etten voinut vastata tutkimusopiskelijoiden ja -opettajien haastatteluissa esittämiin kysymyksiin oli harmillista, mutta valitsin tietoisesti tämän linjan, koska en halunnut saattaa heitä muihin osallistujiin verrattuna eriarvoiseen asemaan. En osaa sanoa, miten tutkittavana olleet opettajat ja opiskelijat kokivat kaksoisroolini. Ehkäpä tutkittavat olisivat esimerkiksi kritisoineet opetusta, mikäli kurssin opettajana olisi toiminut toinen henkilö. Tutkimukseen osallistuminen vaikutti varmaankin myös haastateltaviin ja heidän opiskeluunsa kurssilla, ainakin epäsuorasti.

Ennen kurssien toteutusta suhtauduin tutkittavan aiheen opettamiseen melko kriittisesti. Pohdin paljon esimerkiksi sitä, painottuvatko opetuksessani erityisesti juuri tutkimuskysymyksiini liittyvät asiat. Ajoittain myös jälkihaastattelut aiheuttivat lievää masennusta havaitessani, ettei haastateltava ollut ymmärtänyt jotain tiettyä asiaa, vaikka olin sitä parhaani mukaan opetuksessa käsitellyt. Paikallaan on myös todeta, että oma ymmärrykseni kurssin sisällöstä ja sen opettamisesta kehittyi huomattavasti tutkimuksen tuloksia analysoitaessa ja raportoitessa. Kurssin sisältöä esitellessäni olen kuitenkin pyrkinyt noudattamaan sitä esitystapaa, jota opetuksessa noudatin.

Tutkimuksen vahvistettavuutta parantaa myös sen toteutuksen huolellinen dokumentointi. Tutkimusprosessin huolellinen kuvaus mahdollistaa intersubjektiivisen arvioinnin eli tutkimuksen lukija pystyy seuraamaan tutkimuksen kulkua ja arvioimaan sitä. Pattonin (1990) mukaan tällöin ei ole kuitenkaan kyse objektiivisuudesta, vaan tutkijan luotettavuudesta, uskottavuudesta, rehellisyydestä ja tasapainosta. Tämän tutkimuksen toteutuksen kuvausta käsiteltiin jo siirrettävyyden kriteerin yhteydessä.

#### 6.2.2 Luotettavuuden arviointi laaduntarkkailuprosessina

Kvalen (1996) mukaan haastattelututkimuksessa validointi tulisi nähdä eräänlaisena tutkimustyön laaduntarkkailuprosessina, ja sen tulisi liittyä koko tutkimusprosessiin kaikkine sen vaiheineen. Mielestäni tämä pätee laadulliselle tutkimukselle yleisestikin, joten olen laajentanut kriteeristön koskemaan tämän tutkimuksen koko prosessia. Tässä tutkimuksessa on pyrkimyksenä on ollut hyvän, laadukkaan ja uskottavan tutkimuksen tekeminen koko prosessin ajan. Luvussa 3 esitetyn taulukon 3.8 (s. 64) kysymyksiin vastaaminen ja tutkimuksen laadun arviointi kysymysten kautta jää viime kädessä tämän tutkimuksen lukijalle.

### 6.3 Tutkimuksen teoreettinen ja praktinen merkitys

Tässä tutkimuksessa kvanttifysiikan ymmärtämistä, ja erityisesti oppijoiden kvanttilmiöiden ja -olioiden kuvaamiseen käyttämiä malleja, on kuvattu kahden fysiikan opettajaopiskelijan ja kahden aineenopettajan oppimisprosessikuvausten avulla. Oppimisprosessikuvaukset osoittavat selkeästi oppijoiden käsitysten moninaisuuden ja yksilöllisyyden, vaikkakin käsityksissä voidaan havaita myös yhteisiä piirteitä. Tulokset myös osoittavat, että fysiikan opettajaopiskelijoiden ja aineenopettajien kvanttifysiikan käsitykset ovat sofistikoituneempia ja monitahoisempia kuin lukio-opiskelijoiden käsitykset, joten aiempien lukiotasolla tehtyjen käsitystutkimusten tuloksia ei voida sellaisenaan soveltaa yliopistotason opetusta suunniteltaessa ja toteutettaessa.

Oppiminen on hyvin monitasoinen ilmiö, ja erityisesti kvanttifysiikassa opetus johtaa huolellisesta suunnittelusta huolimatta vain harvoin opettajan tavoittelemaan lopputulokseen (Euler ym. 1999; Greca & Freire 2003). Nykyaikaisen oppimiskäsityksen mukaan oppiminen on kuitenkin aina aktiivinen tiedon konstruointiprosessi, jota opettajan tulisi toiminnallaan tukea (Aho 2002). Lisäksi oppijan konstruoima käsitys opetuksen tavoitteena olevasta tiedosta rakentuu oppijan aiempien käsitysten pohjalta (Tynjälä 1999). Mikäli oppijan aiempi tieto on koherenttia ja ristiriidatonta, on uuden tiedon oppiminen melko vaivatonta, mutta oppijan aiemman tiedon sisältäessä ristiriitaisuuksia suhteessa opittavaan tietoon, oppiminen vaikeutuu (Vosniadou 1994).

Käsillä olevan tutkimuksen tulokset osoittavat, että oppijan aiemman tiedon epäkoherenssi vaikeuttaa uuden tiedon omaksumista, ja toimimattomista malleista tai periaatteista luopuminen on oppijalle vaativa prosessi. Tulosten perusteella voidaan esittää, että metakognitiivisilta taidoiltaan kehittyneemmät tapausoppijat saavuttivat kurssilla paremman kvantti-ilmiöiden ja olioiden ymmärryksen kuin metakognitiivisilta taidoiltaan vaatimattomammat tapausoppijat. Metakognitiivilta taidoiltaan kehittyneemmät tapausoppijat innostuivat opiskelemaan huomattavasti enemmän omassa ymmärryksessään. Taidoiltaan vaatimattomat oppijat eivät tiedostaneet omia tietojaan ristiriitaisiksi tai puuttelliseksi opetuksessa tavoiteltavan tiedon kanssa, eivät siten kokeneet tarpeelliseksi korjata puutteita omassa tiedoissaan.

Tutkimukseen osallistuneet tapausopettajat ja -opiskelijat eivät käyttäneet malleja eriytyneesti ja johdonmukaisesti, vaan muodostivat hybridimalleja useiden eri mallien ominaisuuksista. Tätä vaikeutta ymmärtää mallit ominaisuuksineen ja pätevyysalueineen erillisiksi kutsutaan tässä työssä mallien eriytymättömyydeksi. Samankaltaisia tuloksia on raportoitu aiemmin aineen rakenteen ymmärtämiseen liittyen (Viiri, Hirvonen, Saari, Sormunen & Nisimov 1999). Hieman yksinkertaistaen voidaan ajatella, että monet kvanttifysiikan oppimisen ongelmat olisivat voitettavissa, mikäli oppijat olisivat tietoisia malleista sekä mallien ja todellisuuden välisestä suhteesta eli ontologisista ja epistemologisista kysymyksistä. Tällöin metakäsitteellisen tietoisuuden lisäksi oppijalla tulisi olla metaontologista ja metaepistemologista tietoisuutta. (Asikainen, Hirvonen, Heikkinen, Nivalainen & Viiri 2003)

Mallien ymmärtämisen ongelmiin voidaan pyrkiä vaikuttamaan käsittelemällä malleja korostetusti opetuksessa ja tekemällä eksplisiittiseksi mallien pätevyysalueet ja ominaisuudet (Duit 1991). Tapausoppijoiden haastattelut kuitenkin osoittivat, että oppijoiden aiemmin omaksumat mallit, sekä klassiset että kvanttimallit, vaikuttivat voimakkaasti ilmiöiden ja olioiden oppimiseen, vaikka nämä aiemmat mallit eivät kuuluneetkaan kurssin fysikaaliseen sisältöön. Tällaisia malleja olivat esimerkiksi sähkömagnetismin mallit ja aineen rakenteeseen liittyvät mallit. Moninaisia kvantti-ilmiöihin tai -olioihin joko kiinteämmin tai löyhemmin liittyviä oppijoiden aiempia

malleja ei luonnollisesti voida kuitenkaan tarkastella opetuksessa. Käsitteelliseen ymmärtämiseen tähtäävässä kvanttifysiikan opetuksessa on suositeltavaa kiinnittää huomiota mallien eriytymiseen, mutta se ei yksistään riitä. Fysikaalisen tiedon malliluonnetta tulisi korostaa läpi fysiikan opintojen, kuten myös ontologisia ja epistemologisia kysymyksiä.

Ontologisten kategorioiden teoria (Chi ym. 1994) soveltuu kvanttiolioiden ja klassisten olioiden oppimisen tarkasteluun, koska kvanttioliot ja klassiset oliot ovat ontologisesti erillisiä olioluokkia. Elektronin ja fotonin kvanttiolioisuuden oppiminen vaatii oppijaa sijoittamaan elektronin ja fotonin kvanttiolioiden kategoriaan klassisten kenttien ja hiukkasten ontologisten kategorioiden asemasta. Tulosten mukaan oppijat kuitenkin sijoittavat kvanttioliot sekä klassisten hiukkasten tai aaltojen kategoriaan että kvanttiolioiden kategoriaan. Jotta elektroni ja fotonit kuuluisivat oppijan ajattelussa aidosti kvanttiolioiden kategoriaan, tulisi tämän ymmärtää, etteivät tietyt hiukkasten ja aaltojen ontologiset ominaisuudet päde elektronille ja fotonille. Tämä on oppijalle vaativa tiedostamisprosessi, joka edellyttää kehittyneitä metakognitiivisia taitoja. Chin ym. (1994) mukaan käsitteellisen muutoksen prosessi on erityisen vaativa, mikäli oppijan tulee siirtää käsite toiseen ontologiseen pääkategoriaan. Täten voidaan olettaa, että käsitteellisen muutoksen prosessin vaikeus kasvaa eksponentiaalisesti, mikäli oppijan on luotava täysin uusi ontologinen kategoria. Tietävästi ontologisten kategorioiden teoriaa ei ole aikaisemmin sovellettu kvanttifysiikan käsitteiden oppimiseen tai oppimisen ongelmien selittämiseen.

Kvanttifysiikan oppimisen tutkijat ovat esittäneet erilaisia ratkaisuja kvanttifysiikan oppimisen tehostamiseksi, mutta ne perustuvat yleensä siihen, että opetuskokeiluissa on jätetty tarkoituksellisesti pois ongelmallisiksi tiedettyjä aiheita (Fischler & Lichtfeldt 1992; Müller & Wiesner 2002). Lukiotasolla tämä lieneekin toimiva ratkaisu, mutta ei yliopisto-opinnoissa. Yliopisto-opiskelijat ovat jo lukiossa opiskelleet kvanttifysiikan aiheita, ja esimerkiksi elektronin käsitteeseen suomalaisessa koulujärjestelmässä tutustutaan jo alakoulussa. Voidaankin todeta, että yliopisto-opintojen vaiheessa olevalla oppijalla on paljon uudelleen organisoitavaa tietoa. Tilanne muuttuu vieläkin kompleksisemmaksi, kun kyseessä ovat fysiikan opettajaopiskelijat tai jo työssä olevat opettajat, jotka joutuvat itse opettamaan näitä myöhemmin selitysvoimaisemmillä malleilla korvautuvia malleja. Tässä tilanteessa toimiva ratkaisu voi olla juuri mallintava fysiikan opetus, jossa oppijat tehdään tietoiseksi fysiikan malliluonteesta (Hirvonen, Viiri, Saari, Asikainen & Sormunen 2003).

Tapausopettajien kvanttifysiikan ymmärrystä tarkasteltaessa voidaan todeta, että useat ymmärtämisen ongelmat juontavat juurensa lukion oppikirjojen esityksiin. Lukion modernin fysiikan kurssin oppikirjojen fysikaalisiin sisältöihin tulisi kiinnittää enemmän huomiota pyrkien myös huomioimaan tutkimuskirjallisuudessa raportoidut



oppimisen ongelmakohdat. Epäjohdonmukaisuudet tai epätarkat käsitteenmäärittelyt voivat johtaa ymmärtämisen vaikeuksiin tai pahimmillaan tieteellisen käsityksen vastaisten käsitysten muodostumiseen. Usein oppikirja toiminee myös opettajan tärkeimpänä tiedonlähteenä.

Kvanttifysiikan erityisluonteesta johtuen mallien ymmärtäminen ja niiden käyttö opetuksessa ovat korostuneemmassa asemassa klassiseen fysiikkaan verrattuna. Kvanttifysiikassa mallien, havaintojen, tulkintojen ja todellisuuden välinen suhde on kompleksisempi kuin klassisessa fysiikassa, koska kvanttifysiikassa suoria havaintoja voidaan tehdä vain ilmiöistä, ei olioista. Tutkimuksen tulokset vahvistavat mallien merkityksen tärkeyttä fysiikan opetuksessa lukiotasolla ja opettajankoulutuksessa sekä opettajien täydennyskoulutuksessa.

Fysiikan opetuksessa tulisikin pyrkiä käyttämään opetusmenetelmiä, jotka edesauttavat ja tukevat metakognitiivisten taitojen kehittymistä ja tekevät näkyviksi oppijan käsityksiä ja malleja. Metakognitiiviset taidot ovat kaiken menestyksekkään oppimisen perusta, koska ne mahdollistavat kognitiivisten taitojen, kuten havaitsemisen, ajattelun, muistamisen ja ongelmanratkaisun kehittämisen sekä niissä olevien heikkousten tunnistamisen ja korjaamisen (Schraw 1998; ks. myös Mäntylä 2003). Luonnollisesti metakognitiivisten taitojen kehittyminen vaatii aikaa, joten sen kehittymistä tulisi tukea jo fysiikan perusopinnoista lähtien, eikä vain opettajien erikoiskursseilla.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että kvanttifysiikan erikoiskurssille osana fysiikan opettajaopintoja ja pätevöittämisskoulutusta on todellinen tarve. Tutkimukseen osallistuneiden opettajaopiskelijoiden ja opettajien kvantti-ilmiöiden ja -käsitteiden hallinta oli vaatimatonta tasoa perinteisten kvanttifysiikan opintojen jälkeen, mutta selvästi parempi kurssin jälkeen. Tutkimuksen tulokset myös muistuttavat oppijoiden ennakkotiedon huomioimin tärkeydestä opetuksessa. Fysiikan opintojensa loppuvaiheessa olevilla opiskelijoilla, kuten myös kokeneilla opettajilla, voi esiintyä hyvinkin selkeästi tieteellisen näkemyksen vastaisia käsityksiä ja puutteita aiemmissa tiedoissa. Ennakkotiedon huomioiminen on hyvä lähtökohta opetuksen tavoitteiden mukaisen käsitteellisen muutoksen edistämiseksi (Hirvonen ym. 2003). Näkemykseni mukaan myös vaikeana pidetyn kvanttifysiikan opetuksessa on mahdollista päästä hyviin oppimistuloksiin lähtemällä liikkeelle oppijoiden ennakkotiedoista, tukemalla oppijoiden metakognitiivisten taitojen kehittymistä ja huomioimalla kvanttifysiikan malliluonne. Mainittuja tekijöitä voidaan pitää myös yleisinä laadukkaan fysiikan opetuksen kulmakivinä.

Raportoidut tulokset toimivat syyskuussa 2006 käynnistyneen kolmannen *Modernia fysiikkaa opettajille* -kurssin opetuksen lähtökohtana.

## Lähteet

Aho, L. 2002. Koulu, opetus ja oppiminen. Teoksessa M.-L. Julkunen (toim.) Opetus, oppiminen, vuorovaikutus. Vantaa: Tummavuoren kirjapaino, 19-38.

Ambrose, B. S, Shaffer, P. S., Steinberg, R. N. & McDermott, L. C. 1999. An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics* 67(2), 146-155.

Angel, C., Ryder, J. & Scott, P. 2005. Becoming an expert teacher: Novice physics teachers' development of conceptual and pedagogical knowledge. Esitetty Esera 2005 konferenssissa, saatavilla osoitteesta [http://www.fys.uio.no/~carla/ARS\\_2005.pdf](http://www.fys.uio.no/~carla/ARS_2005.pdf)

Asikainen, M. 2005. A study of students' learning processes on a new quantum physics course for preservice and inservice teachers. Teoksessa H. Fischer (toim.) *Developing Standards in Research on Science Education. The ESERA Summer School 2004*. London: Taylor & Francis, 55-62.

Asikainen M., Hirvonen P. E., Heikkinen M., Nivalainen V. & Viiri J. 2003. A novel quantum physics course for physics teachers: theoretical background. Proceedings of the Fourth ESERA Conference. Saatavilla osoitteesta: <http://www1.phys.uu.nl/esera2003/programme/pdf/219S.pdf>. Sivulla vierailtu 11.12.2005

Asikainen, M., Hirvonen, P. E. & Koponen, I. T. 2005a. Kvanttolioiden oppimisen tarkastelua opettajille suunnatulla kvanttifysiikan kurssilla. Teoksessa A. Virta, K. Merenluoto & P. Pöyhönen (toim.) *Ainedidaktiikan ja oppimistutkimuksen haasteet opettajankoulutukselle*. Turun yliopisto, kasvatustieteiden tiedekunta, Julkaisusarja B: 75. Turku: Painosalama, 112-120.

Asikainen, M., Hirvonen, P. E., Koponen, I. T. 2005b. Physics teacher students' photon models during a quantum physics course. Teoksessa R. Pinto & D. Couso (toim.) *Proceedings of the Fifth International ESERA Conference on Contributions of Research to Enhancing Students' Interest in Learning Science*, 458-460.

Asikainen, M., Hirvonen, P. E. & Viiri, J. 2004. A new research-based quantum physics course for prospective teachers. Teoksessa A. Laine, J. Lavonen & V. Meisalo (toim.) *Current Research on Mathematics and Science Education 2004*. Department of Applied Sciences in Education, Research report 253, Helsinki: University of Helsinki, 265-276.

Asikainen, M., Koponen, I. T. & Hirvonen, P. E. 2006a. Students' conceptions of photon and electron. Teoksessa T. Asunta & J. Viiri (toim.) Pathways into research-based teaching and learning. Polkuja tutkimukselliseen opettamiseen ja oppimiseen. Jyväskylän yliopisto, opettajankoulutuslaitos. Tutkimuksia 83. Jyväskylä. Lähetetty julkaistavaksi.

Asikainen, M., Koponen, I. T. & Hirvonen, P. E. 2006b. Quantum physics course for teachers. In- and pre-service physics teachers as target groups. Lähetetty julkaistavaksi ICPE2006 -konferenssin julkaisuun.

Atkins, P. W. 1994. Physical chemistry. Fifth edition. Oxford: Oxford University Press.

Bao, L. B. & Redish, E. F. 2002. Understanding probabilistic interpretation of physical systems: A prerequisite to learning quantum physics. American Journal of Physics 70(3), 210-217.

Beatty, I. D. & Gerace, W. J. 2002. Probing physics students' conceptual knowledge structures through term association. American Journal of Physics 70(7), 750-758.

Beichner, R. & Saul, J. M. 2003. Introduction to the SCALE-UP (Student-Centered Activities for Large Enrollment Undergraduate Programs) Project. Proceedings of the international school of physics "Enrico Fermi", Varenna, Italy. Lähetetty julkaistavaksi, saatavilla: [http://www.ncsu.edu/PER/Articles/Varenna\\_SCALEUP\\_Paper.pdf](http://www.ncsu.edu/PER/Articles/Varenna_SCALEUP_Paper.pdf), sivulla vierailtu 25.5.2006.

Beichner, R. J., Saul, J. M., Allain, R. J., Deardorff, D. L. & Abbott, D. S. 2000. Introduction to SCALE-UP: Student Centered Activities for Large Enrollment University Physics. Proceedings of the 2000 Annual meeting of the American Society for Engineering Education.

Blatt, F. J. 1992. Modern Physics. Singapore: McGraw-Hill.

Born, M. 1964. The statistical interpretation of quantum mechanics. Teoksessa Nobel lectures, Physics 1942-1962. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 256-267.

Boulter, C. J & Buckley, B. C. 2000. Constructing a typology of models for science education. Teoksessa J. K. Gilbert & C. J. Boulter (toim.) Developing models in science education. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 41-58.

Bransford, J. D., Brown, A. L. & Cocking, R. R. (toim.). 1999. How people learn: Brain, mind, experience, and school.

Brown, D. E. & Clement, J. 1989. Overcoming misconceptions via analogical reasoning: abstract transfer versus explanatory model construction. *Instructional Science* 18(4), 237-261.

Bunge, M. 2003. Twenty-five centuries of quantum physics: From Pythagoras to us, and from subjectivism to realism. *Science & Education* 12, 445-466.

Byrnes, J. P. 2001. *Cognitive development and learning in instructional contexts*. Second edition. United States: Pearson.

Caro, D. E., McDonnell, J. A. & Spicer, B. M. 1978. *Modern physics: an introduction to atomic and nuclear physics*. London: Arnold.

Cataloglu, E. & Robinett, R. W. 2002. Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. *American Journal of Physics* 70(3), 238-251.

Chi, M. T. H. 1992. Conceptual Change within and across Ontological Categories: Examples from Learning and Discovery in Science. Teoksessa R. Giere (toim.) *Cognitive models of science: Minnesota studies in the philosophy of science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 129-186.

Chi, M. T. H. 1995. Interactive roles of knowledge and strategies in the development of organized sorting and recall. Teoksessa Chipman, S., Segal, J. & Glase, R. (toim.) *Thinking and learning skills: Current research and open questions*, Hillsdale, NJ: Erlbaum, 457-483.

Chi, M. T. H. 2005. Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *The Journal of the Learning Sciences* 14(2), 161-199.

Chi, M. T. H., Feltovich, P. & Glaser, R. 1981. Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science* 5, 121-152.

Chi, M. T. H., Glaser, R. & Rees, E. 1982. Expertise in problem solving. Teoksessa R. Steinberg (toim.) *Advances in the psychology of human intelligence*. Hillsdale: Erlbaum, 7-76.

Chi, M. T. H., Slotta, J. D. & de Leeuw, N. 1994. From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction* 4, 27-43.

- Clark, D. & Jorde, D. 2004. Helping students revise disruptive supported ideas about thermodynamics: computer visualizations and tactile models. *Journal of Research in Science Teaching* 41(1), 1-23.
- Clement, C. A. 1993. Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of Research in Science Teaching* 30(10), 1241-1257.
- Clement, J., Brown, D. & Zeitsman, A. 1989. Not all preconceptions are misconceptions: Findings anchoring conceptions' for grounding instruction on students' intuitions. *International Journal of Science Education* 11, 554-564.
- Compton, A. 1925. Directed quanta of scattered X-rays, *Physical Review* 26, 289-299.
- Compton, A. 1961. Scattering of X-rays as particles. *American Journal of Physics* 29, 817-820.
- Compton, A. 1965. X-rays as branch of optics. Teoksessa Nobel lectures, physics 1922-1941. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 174-190.
- De Broglie, L. 1965. The wave nature of the electron. Teoksessa Nobel lectures, physics 1922-1941. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 244-256.
- Denzin, N. K. 1978. *The research art: An introduction to sosiological methods*. New York: McGraw-Hill.
- Denzin, N. K. & Lincoln, Y. S. (toim.). 1994. *Handbook of qualitative research*. California: SAGE Publications.
- diSessa, A. A. 1993. Towards an epistemology of physics. *Cognition and Instruction* 10(2&3), 249-260.
- diSessa, A. A., Gillespie, N. M. & Esterly, J. B. 2004. Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force. *Cognitive Science* 28, 843-900.
- Duit, R. 1991. On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education* 75, 649-672.
- Duit, R., Roth, W.-M., Komorek, M. & Wilbers, J. 2001. Fostering conceptual change by analogies - between Scylla and Sharybdis. *Learning and Instruction* 11, 283-303.

- Euler, M., Hanselmann, M., Müller, A. & Zollman, D. 1999. Students' views of models and concepts in modern physics. Esitetty NARST vuositapaamisessa. Saatavilla osoitteesta: [http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM\\_papers.pdf](http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM_papers.pdf). Sivulla vierailtu 1.10.2005.
- Eysenck, M.W. & Keane, M. 2005. Cognitive psychology. A student's handbook. Fifth edition. Italy, Psychology Press.
- Fischler, H., & Lichtfeldt, M. 1992. Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education* 14, 181-190.
- Fletcher, P. & Johnston, I. 1999. Quantum mechanics: Exploring conceptual change. Esitetty NARST vuositapaamisessa. Saatavilla osoitteesta: [http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM\\_papers.pdf](http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM_papers.pdf). Sivulla vierailtu 1.10.2005.
- Fuchs, C. A. & Peres, A. 1996. Quantum-state disturbance versus information gain: Uncertainty relations for quantum information. *Physical Review A* 53(4), 2038-2045.
- Gerase, W. J. 1992. Contributions from cognitive research to mathematics and science education. Teoksessa D. Grayson (toim.) *Proceedings of the workshop on Research in Science and Mathematics Education*. Pietermaritzburg, South Africa: Teeanem Printers, 25-44.
- Gilbert, J. K., Boulter, C. J. & Elmer, R. 2000. Positioning models in science education – design and technology education. Teoksessa J. K. Gilbert & C. J. Boulter (toim.) *Developing models in science education*. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 3-17.
- Greca, I. M. & Freire, O. Jr. 2003. Does an emphasis on the concept of quantum states enhance students' understanding of quantum mechanics? *Science & Education* 12, 541-557.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., & Smith, C. 1991. Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching* 28(9), 799-822.
- Guba, E. G. 1990. *The Alternative Paradigm Dialog*. Teoksessa E. G. Guba (toim.) *The paradigm dialog*. Newbury Park: Sage Publications, 17-27.
- Guba, E. G. & Lincoln, Y. S. 1994. Competing paradigms in qualitative research. Teoksessa N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (toim.) *Handbook of qualitative research*. California: SAGE Publications, 105-117.

- Gutierrez, R. 2002. Mental models: New tools for new lines of research? Discussion of the concept and its different uses in physics education. GIREP 2002 konferenssi, Lund, Ruotsi, saatavilla osoitteesta <http://pinf.fysik.lu.se/abstracts/fullText/075.pdf>
- Halloun, I. A. 2004. Modeling theory in science education. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Halloun, I. A. & Hestenes, D. 1985. Common sense concepts about motion. American Journal of Physics 53(11), 1056-1065.
- Harré, R. 1970. The principles of scientific thinking. Chigago: The University of Chicago Press.
- Harré, R. 2002. Cognitive science – a philosophical introduction. London: Sage Publications.
- Harrison, A. G. 2001. How do Teachers and Textbook Writers Model Scientific Ideas for Students? Research in Science Education 31, 401-435.
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. 2000. Learning about atoms, molecules and chemical bonds: a case study of multiple-model use in grade 11 chemistry. International Journal of Science Education 84, 352-381.
- Heikkinen, M. 2002. Aalto-hiukkasdualismin ja todennäköisyystulkinnan opetusmallit lukion kvanttifysiikan oppikirjoissa. Pro gradu -tutkielma, fysikaalisten tieteiden laitos, Helsingin yliopisto
- Heikkinen, M. 2005. Student teachers learning about the quantum nature of light and the photon concept: A case study of research based design of teaching in teacher education. Lisensiaatti-tutkielma, fysikaalisten tieteiden laitos, Helsingin yliopisto.
- Heisenberg, W. 1965. The development of quantum mechanics. Teoksessa Nobel lectures, Physics 1922-1941. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 290-301.
- Hirsjärvi, S. & Huttunen, J. 1992. Johdatus kasvatustieteeseen. Juva: WSOY.
- Hirvonen, P. E. 2003. Pintavaarausteoriaan pohjautuvan lähestymistavan vaikutukset tasavirtapiirien ymmärryksen kehittymiseen yliopisto-opetuksessa. University of Joensuu. Department of Physics. Dissertations 36. Joensuu: Joensuun yliopistopaino.
- Hirvonen, P. E., Viiri, J., Saari, H., Asikainen, M. & Sormunen, K. 2003. Asiasisältö ja oppijoiden ennakkotiedot luonnontieteen opetuksen perustana. Dimensio 1/2003.

- Hobson, A. 1996. Teaching quantum theory in the introductory course. *The Physics Teacher*, 202-210.
- Hobson, A. 2003. *Physics. Concepts and connections*. Third edition. Toronto: Prentice Hall.
- Hobson, A. 2005. Electrons as field quanta: A better way to teach quantum physics in introductory general physics course. *American Journal of Physics* 73(7), 630-634.
- Ireson, G. 1999. A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena. *European Journal of Physics* 20, 193-199.
- Johnston, I., Crawford, K. & Fletcher, P. 1998. Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education* 20, 427-446.
- Johnston, A. D. & Southerland, S. A. 2000. A reconsideration of science misconceptions using ontological categories. Esitetty NARST 2000 konferenssissa. Saatavilla osoitteesta <http://physics.weber.edu/johnston/research/>. Sivulla vierailtu 1.10.2005.
- Justi, R. & Gilbert, J.K. 2002. Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education* 24(4), 369-387.
- Kalakoski, V., Laarni, J., Paavilainen, P., Kallio, M., Oksala, E. & Penttilä, M.. 2002. *Persoona – kognitiivinen psykologia*. Helsinki: Edita.
- Kallio-Tamminen, T. 2004. *Quantum metaphysics. The role of human beings within the paradigms of classical and quantum physics*. Academic dissertation. University of Helsinki. Department of philosophy. Helsinki: University of Helsinki.
- Kansanen, P. 2000. Johdantoa kasvatustieteellisissä tutkimuksissa käytettävien tutkimusmenetelmien systematiikkaan. Teoksessa P. Kansanen & K. Uusikylä (toim.) *Opetuksen tutkimuksen monet menetelmät*. Juva: PS-Kustannus, 9-27.
- Kelvin, T. W. 2001. *Popular Lectures and Addresses. Volume 2*. Replica of 1894 edition by Macmillan and Co. New York: Adamant Media Corporation.
- Kidd, J, Ardini, J. & Anton, A. 1989. Evolution of the modern photon, *American Journal of Physics* 57, 27-32.



- Koponen, I. T. & Heikkinen, M. H. 2005. Understanding the photon concept and the quantum nature of light: a case study of learning during an instructional unit designed for student teachers. *Journal of Baltic Science Education* 8(2), 46-54.
- Kragh, H. 2002. *Kvanttisukupolvet*. Helsinki: Terra cognita.
- Kuhn, T. S. 1987. *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*. Chicago: Chicago.
- Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio, R. 1994. *Aaltoliikkeestä dualismiin*. Helsinki: Limes.
- Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio, R. 1998. *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Helsinki: Limes.
- Kvale, S. 1996. *InterViews – An introduction to qualitative research interviewing*. Thousand Oaks: Sage Publications.
- Lehtinen, E. & Kuusinen, J. 2001. *Kasvatuspsykologia*. Juva: WS Bookwell Oy.
- Leinonen, J. 2002. Ymmärtäminen – jäsentynyttä tietämistä. *Kasvatus* 5/2002, 475-483.
- Leinonen, J. 2003. Käsite ja ymmärtäminen. *Kasvatus* 1/2003, 57-65.
- Lévy-Leblond, J.-M. 2003. On the nature of quantons. *Science & Education* 12, 495-502.
- Lévy-Leblond, J.-M. & Balibar, F. 1990. *Quantics. Rudiments of quantum physics*. Amsterdam: North-Holland.
- Limon, M. 2001. On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: a critical appraisal. *Learning and Instruction* 11, 357-380.
- Lincoln, Y. S. 1990. The making of a constructivist – A remembrance of transformations past. Teoksessa Guba, E. G. (toim.) *The paradigm dialog*. Newbury Park: Sage Publications, 67-87.
- Lähde, M. 2002. *Valmistuneiden fysiikan opettajien näkemyksiä aineenopettajakoulutuksesta*. Pro Gradu -tutkielma, Joensuun yliopisto.
- Maalampi, J. & Perko, T. 2002. *Lyhyt modernin fysiikan johdatus*. Helsinki: Limes.

- Mannila, K., Koponen, I. T. & Niskanen, J. 2002. Building a picture of students' conceptions of the wave- and particle-like properties of quantum entities. *European Journal of Physics* 23, 45-53.
- Martin, P. J., Gould, P. L., Oldaker, B. G., Miklich, A. H. & Pritchard, D. E. 1987. Diffraction of atoms moving through a standing light wave. *Physical Review A* 36(5), 2495-2498.
- Mashhadi, A. & Woolnough, B. 1999. Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities. *European Journal of Physics* 20, 511-516.
- Matthews, M. R. 1994. *Science teaching. The role of history and philosophy of science.* London: Routledge.
- McDermott, L. C. 1990. A perspective on teacher preparation in physics and other sciences: The need for special courses for teachers. *American Journal of Physics* 58(8), 735-742.
- Mehra, J. & Rechenberg, H. 1982 *The historical development of quantum theory. Volume 1. Part 1 & Part 2. The quantum theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: It's foundation and the rise of its difficulties 1900-1925.* New York: Springer-Verlag.
- Meltzer, D. E. & Manivannan, K. 2002. Transforming the lecture-hall environment: The fully interactive lecture demonstrations. *American Journal of Physics* 70 (6), 639-654.
- Merenluoto, K. & Lehtinen, E. 2004. Number concept and conceptual change: towards a systemic model of the processes of change. *Learning and Instruction* 14, 519-534.
- Millar, R. 1989. Constructive criticisms. *International Journal of Science Education* 11, 587-596.
- Millikan, A. 1916. A direct photoelectric determination of Planck's constant "h", *Physical Review* 2, 109-143.
- Millikan, A. 1965. The electron and the light-quant from the experimental point of view. *Teoksessa Nobel lectures, Physics 1922-1941.* Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 54-66.
- Moilanen, P. 2000. Laadullisen tutkimuksen filosofia. *Kasvatus* 2, 183-188.

- Monk, M. & Osborne, J. 1997. Placing the history and philosophy of science on the curriculum: A model for the development of pedagogy. *Science Education* 81(4), 405-424.
- Müller, R. & Wiesner, H. 1999. Students' conceptions of quantum physics. Esitetty NARST 1999 konferenssissa. Saatavilla osoitteesta [http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM\\_papers.pdf](http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM_papers.pdf) . Sivulla vierailtu 1.10.2005.
- Müller, R. & Wiesner, H. 2002. Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics* 70(3), 200-209.
- Mäntylä, E. 2003. Kuudesluokkalaisten oppilaan reflektio ja metakognitio itseohjautuvuutta harjoittavassa opiskeluprojektissa. Joensuun yliopiston kasvatustieteellisiä julkaisuja, n:o 87. Joensuu: Joensuun Yliopistopaino.
- Niedderer, H. 2004. Henkilökohtainen keskustelu Eseran kesäkoulussa, Esera Summerschool 2004.
- Norman, D. A. 1983. Some observations on mental models. Teoksessa D. Gentner & A. Stevens (toim.) *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 7-14.
- Novak, J. D. 2002. Tiedon oppiminen, luominen ja käyttö. Käsitekartat työvälineinä oppilaitoksissa ja yrityksissä. Keuruu: PS-kustannus.
- Olsen, R. V. 2002. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education* 24, 565-574.
- Osborne, J. 2005. The role of argument in science education. Teoksessa K. Boersma, M. Goedhart, O. de Jong & H. Eijkelhof (toim.) *Research and the quality of science education*. Dordrecht: Springer, 367-380.
- Opetushallitus. 2003. Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003. Saatavilla osoitteesta: <http://www.oph.fi/SubPage.asp?path=1,17627,5238,5242>.
- Pais, A. 1982. 'Subtle is the Lord...' The life and science of Albert Einstein. New York: Oxford University Press.
- Patrikainen, S. & Toom, A. 2000. Stimulated recall – opettajan pedagogisen ajattelun ja toiminnan tutkimisen menetelmä. Teoksessa P. Kansanen & K. Uusikylä (toim.) *Opetuksen tutkimuksen monet menetelmät*. Juva: PS-Kustannus, 239-260.

- Patton, M. Q. 1990. *Qualitative evaluation and research methods*. Second edition. London: Sage Publications.
- Petri, J. & Niedderer, H. 1998. A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education* 20(9), 1075-1088.
- Pfundt, H. & Duit, R. 1989. *Bibliography: students' alternative frameworks and science education*. IPN Reports in brief. University of Kiel, West-Germany. Institute for Science Education.
- de Podesta, M. 1992. *Understanding the properties of matter*. London: Taylor and Francis.
- Pospiech, G. 2003. Philosophy of quantum mechanics in science teaching. *Science & Education* 12, 559-571.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. & Gertzog, W. A. 1982. Accomodation of a scientific conception: Towards a theory of conceptual change. *Science Education* 66(2), 211-227.
- Rauste-von Wright, M. & Von Wright, J. 1996. *Oppiminen ja koulutus*. Juva: WS Bookwell.
- Rauste-von Wright, M., von Wright, J. & Soini, T. 2003. *Oppiminen ja koulutus*. Juva: WS Bookwell.
- Rebello, N. S. & Zollman, D. 1999. Conceptual understanding of quatum mechanics after using hands-on and visualization instructional materials. Esitetty NARST vuositapaamisessa. [http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM\\_papers.pdf](http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM_papers.pdf). Sivulla vierailtu 1.10.2005.
- Redish, E. F., Saul, J. M. & Steinberg, R. N. 1998. Student expectations in introductory physics. *American Journal of Physics* 66, 212-224.
- Redish, E. F. & Steinberg, R. N. 1999. Teaching physics: figuring out what works. *Physics Today* 52, 24-30.
- Rutherford, M. 2000. Models in explanations of physics: The case of light. Teoksessa J. K. Gilbert & C. J. Boulter (toim.) *Developing models in science education*. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 253-270.

- Saari, H. 2000. Oppilaiden käsitys malleista ja mallintaminen fysiikan peruskouluopetuksessa. University of Joensuu, Department of Physics, Dissertations 22. Joensuu: Joensuun yliopistopaino.
- Saariluoma, P. 1990. Taitavan ajattelun psykologia. Keuruu: Otava.
- Saariluoma, P., Kamppinen, M. & Hautamäki, A. (toim.) 2001. Moderni kognitiotiede. Helsinki: Yliopistopaino.
- Sánchez, G. & Valcárcel, M. V. 1999. Science teachers' views and practices in planning for teaching. *Journal of Research in Science Teaching* 36, 493-513.
- Sarantakos, S. 1994. *Social Reseach*. Hong Kong: MacMillan Press.
- Savinainen, A. 2004. High school students' conceptual coherence of qualitative knowledge in the case of the force concept. University of Joensuu, Department of Physics, Dissertations 36. Joensuu: Joensuun yliopistopaino.
- Savinainen, A., Scott, P. & Viiri, J. 2004. Using a bridging representation and social interactions to foster conceptual change: Desinging and evaluation an instructional sequence for Newton's third law. *Science Education* 89(2), 175-195.
- Schraw, G. 1998. Promoting general metacognitive awareness. *Instructional Science* 26, 113-125.
- Schwandt, T. A. 1994. Constructivist, interpretivist approaches to human inquiry. Teoksessa N.K. Denzin & Y.S. Lincoln (toim.) *Handbook of qualitative research*. Thousand Oaks: Sage, 118-137.
- Scott, P. H., Asoko, H. M. & Driver, R. H. 1991. Taching for conceptual change: a review of strategies. Teoksessa R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderrer (toim.) *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*. Proceedings of an International Workshop, 310-329.
- Slotta, J. D, Chi, M. T. H. & Joram, E. 1995. Assessing students' misclassifications of physics concepts: An ontological basis for conceptual change. *Cognition and Instruction* 13(3), 373-400.
- Smith, J. K. 1990. Alternative research paradigms and the problem of criteria. Teoksessa Guba, E. G. (toim.) *The paradigm dialog*. Newbury Park: Sage Publications, 167-187.

- Sommers, F. 1963. Types of ontology. *Philosophical Review* 72, 327-363.
- Stake, R. E. 1995. *The art of case study research*. Thousand Oaks: Sage.
- Steinberg, R., Wittmann, C., Bao, L. & Redish, E. F. 1999. The influence of student understanding of classical physics when learning quantum mechanics. Esitetty NARST vuositapaamisessa. [http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM\\_papers.pdf](http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM_papers.pdf). Sivulla vierailtu 1.10.2005.
- Steinberg, R. N. & Oberem, G. E. 2000. Research-based instructional software in modern physics. *Journal of Computer and Mathematics Science Teaching* 19(2), 115-136.
- Steinberg, R. N., Oberem, G. E. & McDermott, L. C. 1996. A computer program on the photoelectric effect: A research tool and an instructional aid. *American Journal of Physics* 64(11), 1370-1379.
- Sutinen, P. 2005. *Vanhempana ja aikuisena uusperheessä*. Helsingin yliopiston kasvatustieteen laitoksen tutkimuksia 203. Helsinki: Yliopistopaino.
- Syrjälä, L., Ahonen, S., Syrjäläinen, E. & Saari, S. 1995. *Laadullisen tutkimuksen työtapoja*. Kirjayhtymä Oy: Helsinki.
- Tall, D. O. & Vinner, S. 1981. Concept image and concept definition in mathematics, with special reference to limits and continuity. *Educational Studies in Mathematics* 12, 151-169.
- Tuomi, J. & Sarajärvi, A. 2004. *Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi*. Jyväskylä: Tammi.
- Tynjälä, P. 1991. Kvalitatiivisten tutkimusmenetelmien luotettavuudesta. *Suomen kasvatustieteellinen aikakauskirja Kasvatus* 22(5-6), 387-398.
- Tynjälä, P. 1999. Konstruktivistinen oppimiskäsitys ja asiantuntijuuden rakentaminen koulutuksessa. Teoksessa A. Etäpelto & P. Tynjälä (toim.) *Oppiminen ja asiantuntijuus. Työelämän ja koulutuksen näkökulmia*. Juva: WSOY, 160-179.
- Van Driel, J. H. & Verloop, N. 1999. Teachers' knowledge on models and modelling in science. *International Journal of Science Education* 21, 1141-1154.

- Viiri, J. 1995. voimakäsitteen opettaminen ja oppiminen insinöörikoulutuksen fysiikan kurssissa. University of Joensuu, Department of Physics, Dissertations 7. Joensuu: Joensuun yliopistopaino.
- Viiri, J., Hirvonen, P. E., Saari, H., Sormunen, K. & Nisimov, S. U. 1999. Is an iron atom made of iron? Teoksessa M. Bandiere, S. Cavita, E. Torracca & M. Vicentini (toim.) Research in science education in Europe. Dordrecht: Kluwer, 89-95.
- Vokos, S., Shaffer, P. S., Ambrose, B. S. & McDermott, L. C. 2000. Student understanding of the wave nature of matter: Diffraction and interference of particles. Physics Education Research, American Journal of Physics Supplement 68(7), S42-S52.
- Vosniadou, S. 1994. Capturing and modeling the process of conceptual change. Learning and Instruction 4, 45-69.
- Vosniadou, S. 1997. The development of the understanding of abstract ideas. Teoksessa K. Harnqvist & A. Burgen (toim.) Growing up with science, London: Jessica Kingsley Publishers, 40-58.
- Vosniadou, S. 2002. Mental models in conceptual development. Teoksessa L. Magnani & N. Nersessian (toim.) Model-based reasoning: Science, technology, values. New York: Kluwer Academic Press.
- Vuorinen, R., Tuulala, V. & Mikkonen, E. 1995. Psykologian perusteet: Ihminen tiedonkäsittelijänä. Helsinki: Otava.
- Wittmann, M., Steinberg, R. N. & Redish, E. F. 2002. Investigating student understanding of quantum physics: Spontaneous models of conductivity. American Journal of Physics 3, 218-226.
- Yin, R. K. 2002. Case study research. Design and methods. 3rd edition. London: Sage.
- Young, H. D. & Freedman, R. A. 2004. Sears and Zemansky's university physics with modern physics. 11<sup>th</sup> edition. International edition. San Francisco: Addison Wesley.
- Zollman, D. A., Rebello N. S. & Hogg, K. 2002. Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology. American Journal of Physics 70(3), 252-259.

## **Liitteet**



Opiskelijoiden kurssin esitesti

TAUSTATIEDOT:

Nimi: \_\_\_\_\_

Pääaine: \_\_\_\_\_

Vuosikurssi: \_\_\_\_\_

Suoritetut opinnot:

Fysiikan opintoja (ov) \_\_\_\_\_

Pedagogisia opintoja (ov) \_\_\_\_\_

Kvantti- ja atomifysiikka kyllä \_\_\_ ei \_\_\_

Kvanttifysiikka (laudatur) kyllä \_\_\_ ei \_\_\_

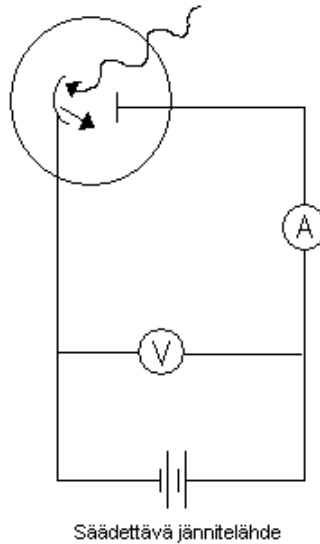
VASTAA SEURAAVIIN KYSYMYKSIIN PERUSTELLEN.

1. Määrittele seuraavat käsitteet.

- a) vapausaste
- b) kvantittuminen
- c) fotonit
- d) ominaislämpökapasiteetti
- e) sironta
- f) absorptio
- g) emissio
- h) vuorovaikutus
- i) elektroni
- j) spin
- k) klassinen tasanjakautumisen periaate
- l) malli fysiikassa
- m) kenttä

2. Mitä ovat säilymislait ja mitä niillä tarkoitetaan? Mitkä ovat niiden pätevyysalueet?

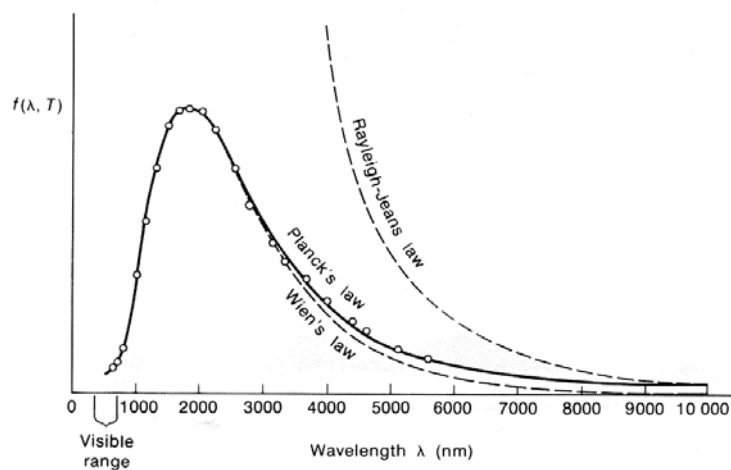
3. Kuvaile hiukkasta klassisessa fysiikassa. Miten kvanttifysikaalinen hiukkanen poikkeaa klassisesta hiukkasesta?
4. Tarkastele kuviota 1 ja vastaa kysymyksiin.



Kuvio 1.

- a) Mihin ilmiöön kuvassa oleva laitteisto liittyy? Selitä kyseinen ilmiö.
- b) Kuvaile laitteiston toimintaperiaatetta.

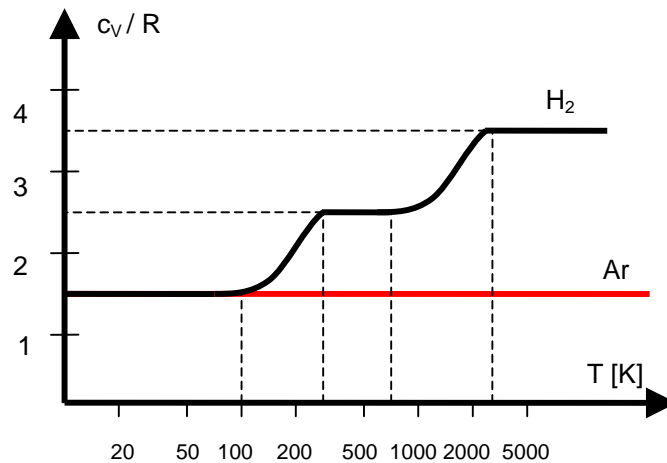
5. Tarkastele kuviota 2.



Kuvio 2.

- Mihin havaintoihin kuvion 1 esittämät kuvaajat mielestäsi liittyvät?
- x-akselilla on aallonpituus (wavelength  $\lambda$  (nm)), mutta mitä kuvaa y-akselilla oleva funktio  $f(\lambda, T)$ ? Entä mikä on sen yksikkö?
- Vertaa Wienin lain, Planckin lain ja Rayleigh-Jeansin lain pätevyysalueita toisiinsa. Kokeelliset tulokset on merkitty pallosymbolein.
- Tarkastele Planckin lain kuvaajaa pidemmiltä aallonpituuksilta lyhyempiin päin. Mistä johtuu, että kuvaaja lähestyy voimakkaasti nollaa maksimikohdan jälkeen aallonpituusalueella n. 1700-500nm?

6. Tarkastele kuviota 3 ja vastaa kysymyksiin.



Kuvio 3.

- Mitä havaintoja kuvio 3 mielestäsi esittää ja mihin ilmiöön se mielestäsi liittyy?
- Miten selität kuvaajassa olevat ”portaavat”? Mitä kuvaajasta voidaan päätellä, kun lämpötila on 100K, 200K, 500K, 1200K tai 5000K?
- Miksi kyseisen ilmiön selittäminen oli ongelma klassisessa fysiikassa?

Opettajien kurssin esitesti.

TAUSTATIEDOT

Nimi: \_\_\_\_\_

Pääaine: \_\_\_\_\_

Aiemmat kvantti- ja atomifysiikan opinnot:

cum laude taso \_\_\_\_ ov

laudatur taso \_\_\_\_ ov

Oppilaitos, jossa työskentelen parhaillaan: \_\_\_\_\_

Opetuskokemus: \_\_\_\_ vuotta

Opetuskokemus modernin fysiikan lukiokurssilta: \_\_\_\_ vuotta

\_\_\_\_ en ole opettanut kyseistä kurssia

1. Miten ymmärrät seuraavat käsitteet?

- a) vapausaste
- b) kvantittuminen
- c) energian tasanjakautumisen periaate
- d) kenttä
- e) sironta
- f) absorptio
- g) emissio

2. Miten kuuluvat ns. suuret säilymislait? Mitkä ovat niiden pätevyysalueet?

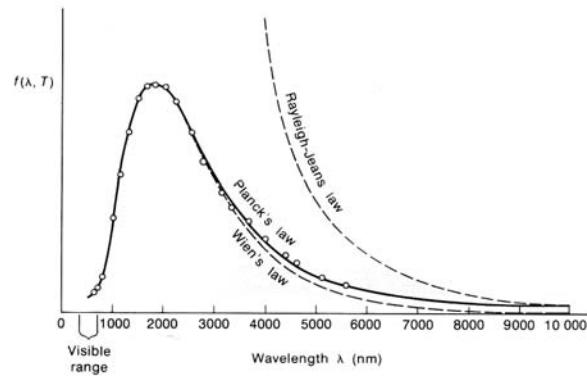
3. Mitä ymmärrät hiukkasella? Mitä ominaisuuksilla hiukkasella on? Miten hiukkasta voidaan kuvailla?

4. Miten mielestäsi kvanttifysiikka poikkeaa klassisesta fysiikasta?

5. a) Selitä valosähköinen ilmiö

b) Mikä on valosähköisen ilmiön merkitys kvanttifysiikassa?

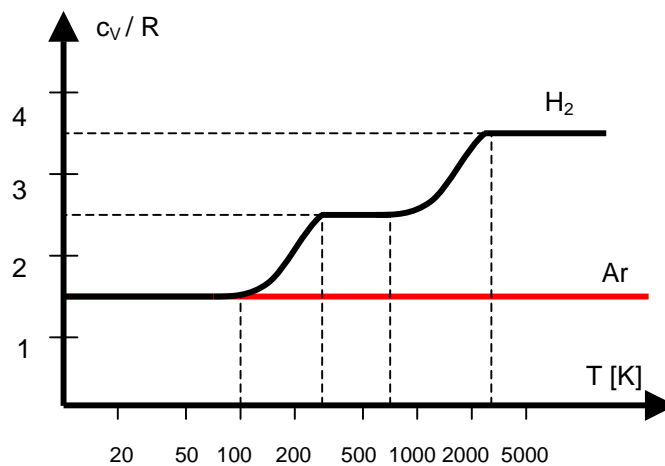
6. Kuvio 1 esittää mustan kappaleen säteilyyn liittyviä lakeja ja kokeellisia arvoja (pallosymbolit).



Kuvio 1.

- Mitä mustalla kappaleella tarkoitetaan?
- Selitä mustan kappaleen säteilyspektri.
- Mustan kappaleen säteilyyn liittyy läheisesti käsite ultraviolettikatastrofi. Mitä se tarkoittaa?
- Mikä on mustan kappaleen säteilyn merkitys kvanttifysiikassa?

7. Kuvio 2 esittää vedyn ja argonin ominaislämpökapasiteetteihin liittyviä kokeellisia



havaintoja.

Kuvio 2.

- Miten selität kuvion 3 kuvaajien käyttäytymisen?
- Mikä oli kyseisen ilmiön merkitys kvanttifysiikassa?

Esimerkkejä opiskelijoiden kurssin lopputestin tehtävistä

1. Fotoni ja elektroni kvanttiolioina. Tarkastele vastauksessasi fotonia ja elektronia luonnehtivia ominaisuuksia.
2. Mikä on seuraavien kaavojen fysikaalinen merkitys? Esitä kaavat kaavamuodossa ja avaa niiden merkitystä sanallisesti.
  - a) Comptonin sirontakaava
  - b) Einsteinin kaava valosähköiselle ilmiölle
  - c) De Broglien relaatio
3. Mustan kappaleen säteily ja säteilylait. Tarkastele vastauksessasi seuraavia seikkoja:
  - Mitä mustalla kappaleella ymmärretään?
  - Mitä lakeja mustan kappaleen säteilyn historiaan liittyy?
  - Millaisia tuloksia kyseiset lait antoivat?
  - Mikä ”ongelma” mustan kappaleen säteilyyn liittyi ja miten se ratkesi?

Esimerkkejä opettajien kurssin lopputestin tehtävistä

1. Esitä seuraavat kaavat ja selitä niiden fysikaalinen merkitys lyhyesti.
  - d) Comptonin sirontakaava
  - e) Einsteinin kaava valosähköiselle ilmiölle
  - f) De Broglie'n relaatio
  - g) Heisenbergin epätarkkuusperiaate
  
2. Määrittele seuraavat käsitteet ja kerro lyhyesti miten käsitteitä voidaan lähestyä opetuksessa.
  - a. kvantittuminen
  - b. vapausaste
  - c. kvanttiluku  $l$
  - d. dualismi
  
3. Elektroni ja fotoni kvanttioliona. Miten kvanttioliot ja niiden tarkastelu poikkeavat klassista olioista? Mitä ominaisuuksia elektronilla ja fotonilla on?
  
4. Mustan kappaleen säteilylait.

Kurssin palautekysely

Pyydän sinua seuraavassa arvioimaan kurssia. Mielipiteesi on erittäin tärkeä kurssin kehittämisen kannalta. Antamasi palaute ei vaikuta kurssin arvosteluun! Valitse annetuista vaihtoehtoista mielestäsi sopivin. Halutessasi voit myös kommentoida lyhyesti.

**Nimi:** \_\_\_\_\_

**Kurssin sisältö.** Reagoi seuraaviin väittämiin valitsemalla 5 = samaa mieltä, 4 = melko samaa mieltä, 3 = ei samaa eikä eri mieltä, 2 = melko eri mieltä, 1 = eri mieltä.

Kurssilla käytetty opetusmenetelmä (taustatehtävät + luentotehtävät + kotitehtävät) on hyödynnettävissä myös koulutasolla	1	2	3	4	5
Kurssin työmäärä ja opintoviikkomäärä vastasivat hyvin toisiaan	1	2	3	4	5
Kurssin sisältö ja opintoviikkomäärä vastasivat hyvin toisiaan	1	2	3	4	5
Kurssi antoi minulle valmiuksia ymmärtää modernin fysiikan perusteita	1	2	3	4	5

Yleisiä kommentteja edellisiin liittyen:

**Kurssin taso.** Valitse mielestäsi parhaiten kurssin osa-alueita kuvaava vaihtoehto. 5 = vaativa, 4 = melko vaativa, 3 = ei vaativa eikä helppo, 2 = melko helppo, 1 = helppo.

Kurssi yleisesti	1	2	3	4	5
Taustatehtävät	1	2	3	4	5
Luentotehtävät	1	2	3	4	5
Kotitehtävät	1	2	3	4	5

Yleisiä kommentteja edelliseen liittyen:



**Opetusmenetelmät.** Miten koit kurssilla käytetyt menetelmät oman oppimisesi kannalta? Arvioi asteikolla 5 = hyvä, 4 = melko hyvä, 3 = ei hyvä eikä huono, 2 = melko huono, 1 = huono.

Taustatehtävät 1 2 3 4 5

Luentotehtävät 1 2 3 4 5

Kotitehtävät 1 2 3 4 5

Luennot 1 2 3 4 5

Yleisiä kommentteja edellisiin liittyen:

**Oma työpanoksesi.** Arvioi omaa suoriutumistasi kurssilla. 5 = hyvä, 4 = melko hyvä, 3 = ei hyvä eikä huono, 2 = melko huono, 1 = huono.

Osallistuminen lähiopetukseen (läsnäolo) 1 2 3 4 5

Tuntiaktiivisuus 1 2 3 4 5

Tausta- ja kotitehtävien tekeminen 1 2 3 4 5

Tenttiin valmistautuminen 1 2 3 4 5

Yleisiä kommentteja edellisiin liittyen:

Mikä oli kurssilla hyvää ja mikä huonoa?

Mitä oli liikaa ja mitä liian vähän?

Miten kurssia tulisi mielestäsi kehittää?

Minkä yleisarvosanan antaisit kurssille?

Muita kommentteja ja terveisiä kurssin opettajalle:

Kiitos kurssille ja tutkimukseen osallistumisesta!

Aurinkoista ja lämmintä kesää toivottaen,

Mervi

Kurssimateriaalin pääasialliset lähteet

Atkins, P. W. 1994. *Physical chemistry*. Fifth edition. Oxford: Oxford university press.

Blatt, F. J. 1992. *Modern Physics*. International edition. Singapore: McGraw-Hill.

Hobson, A. 2003. *Physics, concepts and connections*. Third edition. New Jersey: Prentice Hall.

Knight, R. D. 2004. *Physics for scientists and engineers with modern physics. A strategic approach*. International edition. San Francisco: Addison Wesley.

Kragh, H. 2002. *Kvanttisukupolvet*. Helsinki: Terra cognita.

Kälviäinen, J., Ketolainen, P., Hämäläinen, R., Paulin, Ö. ja Glad, S. 1984. *Lukiofysiikka. Laaja oppimäärä, kurssit 6-8*. Keuruu: Otava.

Lavonen, J. Kurki-Suonio, K. ja Hakulinen, H. 1998. *Galilei. Moderni fysiikka*. Porvoo: WSOY.

Lévy-Leblond, J.-M. ja Balibar, F. 1990. *Quantics. Rudiments of quantum physics*. Amsterdam: North-Holland.

Maalampi, J. ja Perko, T. 2002. *Lyhyt modernin fysiikan johdatus*. Helsinki: Limes.

Makkonen, J., Meisalo, V. ja Suokko, E. 1996. *Lukion fysiikka. Atomista avaruuteen. Moderni fysiikka*. Keuruu: Otava.

Mehra, J. ja Rechenberg, H. 1982. *The historical development of quantum theory. Volume 1. Part 1 & Part 2. The quantum theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its foundation and the rise of its difficulties 1900-1925*. New York: Springer-Verlag.

Pais, A. 1982. 'Subtle is the Lord...' The science and the life of Albert Einstein. New York: Oxford University Press.

de Podesta, M. 1992. *Understanding the properties of matter*. London: Taylor and Francis.

Young, H. D. ja Freedman, R. A. 2004. *Sears and Zemansky's university physics with modern physics*. 11<sup>th</sup> edition. International edition. San Francisco: Addison Wesley.

## Liite 7

Opiskelijoiden kurssin tuntisuunnitelma, lukukausi 2004

Viikko	Aihe	Tuntimäärä
3	Esitesti ja kurssin esittely	2h
4-5	Fysiikan osa-alueet, säilymislait, mallit	3h
5-6	Lämpökapasiteettien lämpötilariippuvuus	6h
6-7	Mustan kappaleen säteily	8h
7-9	Valosähköinen ilmiö	7h
9-10	Comptonin ilmiö	6h
10-11	Kaksoisrakokoe ja dualismi	5h
11	Kvantti- ja aaltomekaniikkaa	2h
	Elektronin spin	2h
12	Hiukkasfysiikan perusteita	4h
14	Lopputesti	3h
	Yhteensä	48h

## Opettajien kurssin tuntisuunnitelma, lukukausi 2004-2005

Viikko	Aihe	Tuntimäärä
37	Esitesti ja kurssin esittely	2h
	WebCT:n käytön harjoittelu	2h
40	Fysiikan osa-alueet, säilymislait, mallit	1h
	Lämpökapasiteettien lämpötilariippuvuus	3h
46	Lämpökapasiteettien lämpötilariippuvuus	2h
	Mustan kappaleen säteily	2h
49	Kaksoisrakokokeen testi	1h
	Mustan kappaleen säteily	2h
	Valosähköinen ilmiö	1h
4	Valosähköinen ilmiö	1h
	Comptonin ilmiö	3h
8	Comptonin ilmiö	1h
	Kaksoisrakokoe ja dualismi	3h
13	Atomien spektrit	4h
	Atomimallit	
19	Kvantti- ja aaltomekaniikkaa	2h
	Elektronin spin	2h
23	Lopputesti	4h
	Yhteensä	32h

## Opiskelijoiden hiukkasen käsitysten kategorisointi

*Kuvaile hiukkasta klassisessa fysiikassa. Miten kvanttifysikaalinen hiukkanen poikkeaa klassisesta hiukkasesta?*

### 1. Determinismi vs. tn-tulkinta

Lauri: Klassisessa fysiikassa kaikilla kappaleilla on tarkka paikka ja tarkka liikemäärä. Kvanttifysikaalisella hiukkasella nämä voidaan tietää vain tietyllä todennäköisyydellä. .

Aapo: Hiukkasen paikka ja nopeus tunnetaan tai voidaan aina laskea klassisessa fysiikassa. Kvanttifysikaalisen hiukkasen paikasta voidaan vain sanoa jokin todennäköisyys, että se on tietyllä hetkellä tietyssä paikassa (tai alueella). Myöskään kvant. Fys. hiukkasen nopeutta ei tunneta tarkasti (Heisenbergin epätarkkuus pa.)

Leevi: Klassisessa fysiikassa hiukkanen on n. normaalipainoinen, sillä on n. normaalinopeus ja sen paikka ja liikerata tiedetään. Kvanttifysiikassa hiukkasen paikka- ja liikerata perustuu todennäköisyyksiin.

Lari: Klassisessa fysiikassa hiukkasella on massa ja sen paikka voidaan selvittää jatkuvasti ajan funktiona. Kvanttihiukkasen paikkaa ei voida tietää tai kuvata jonkin ajasta riippuvan funktion avulla. vain todennäköisyyksiä sen ilmestymispaikasta voidaan laskea.

### 2. Massallisuus / massattomuus

#### 2a. Massa

Pertti: Hiukkasella on tietty massa, nopeus ja energia

#### 2b. Massaton

Lasse: Hiukkanen on todella pieni olio, jolla ei ole massaa.

### 3. Suhteellisuusteoreettinen hiukkanen

Erkki: Hiukkanen = klas. hiukkasella on massa, joka säilyy. Hiukkasen nopeus on klas. fysiikan alueella eli  $< 0,10c$  (noin.). Kvanttifys. hiukkasen massa ei säily. Nopeudet ovat valonnopeutta.

### 4. Jatkuva energiajakauma vs. energiatilat

Esko: Klassisella hiukkasella on jatkuva energiajakauma. KF-hiukkasella on tietyt tilat, jotka määräävät sen energiatasot. Siksi se voi vastaanottaa ja luovuttaa energiaa tilojen energioiden erotuksen määräämiä määriä. Kv-hiukkanen ”käsittämättömän” pieni. (hiukkanen vai ilmiö?)

## Opettajien hiukkasen käsitysten kategorisointi

*Mitä ymmärrät hiukkasella? Mitä ominaisuuksia hiukkasella on? Miten hiukkasta voidaan kuvailla?*

### 1a. Mallit: dualismi

Usko: Hiukkasella voi olla massa, energiaa, varaus. Sille voidaan määrittää liikemäärä ja sen käyttäytymistä voidaan selittää myös aaltomallin avulla. Hiukkasella ei välttämättä ole mitään muotoa...?

Heikki: Hiukkanen, sillä on yleensä massa (ainakin liikemassa), se voi olla vuorovaikutuksessa materian kanssa. Makromaailman hiukkaset ovat konkreettisia, "silmällä havaittavia", kun taas mikromaailman hiukkasista osa saadaan todennettua vain vuorovaikutuksista materian kanssa. osa vain aaltomallin avulla.

Tuomas: Hiukkanen on aineen rakenneosanen jolla voi olla tiettyjä ominaisuuksia (massa, sähkövaraus jne.). Hiukkanen koostuu alkeellisimmista hiukkasista. Aineen perusrakenneosiksi sanotaan kvarkkeja ja leptoneita, joilla ei ole sisäistä rakennetta (ehkä nykyisin jo tutkitaan niidenkin rakenneosia). hiukkasta saatetaan kuvata klassisen fysiikan tapaan kappaleeksi jolla on tietty koko ja ehkä pallon muoto tai aaltomallin mukaan voidaan antaa todennäköisyysjakauma hiukkasen esiintymiselle.

Jaakko: Hiukkanen voidaan kuvata pienenä partikkelina jolla on paikka, massa ja nopeus. Dualismi periaatteen mukaan hiukkanen voi olla myös energiakvantti, jota voidaan kuvata aaltona. Valon luonnetta voidaan kuvata hiukkasina ja aaltoina.

Viljo: Esim. Valolla on sekä aaltoluonne että hiukkasluonne (mantra!). Molemmat (siis myös hiukkanen) ovat malleja, joilla voidaan kuvata valon tiettyjä ominaisuuksia.

### 1b. Mallit: hiukkasta voidaan kuvata malleilla

Eero: Hiukkanen on erittäin pieni. Hiukkasella voi olla massa esim. Elektroni, protoni ja sähkövaraus. Hiukkasta voidaan kuvata malleilla koska emme näe niitä.

Aapeli: Hiukkanen: jokin (ei "konkr. havaittava) pieni "otus" jolla on massa. Voidaan kuvata eri mallien avulla.

## 2. Aineen rakenneosa

Janne: Aineen pienimmät rakenneosat. Ominaisuuksina varmaan massa nyt ainakin.

Otto: Pieni "osanen". Esim. Alkeishiukkaset. Hiukkasella on massa ja energia.

Paavo: Hiukkanen on aineen pieni osanen, hiukkasilla voi olla dimensiot ja massaa sekä sähköinen varaus.

Juhani: Periaatteessa pienin olio, josta voidaan tehdä havaintoja. Hiukkasen energia on kvantittunut. Aine koostuu hiukkasista.

### **3. Massallisuus / massattomuus**

#### 3a. Massa

Uolevi: Hiukkasella on massa.

Unto: Hiukkasella on massa, mahdollisesti varaus. Hiukkasta voidaan kuvailla xxx minkäläisiin osiin se hajoaa.

#### 3b. Massallinen tai massaton

Tauno: Hiukkanen on "hitu". Sillä on massa tai sitte ei (massaton hiukkanen, joka on omituinen otus). Hiukkanen on jotenkin rajallinen "olento" ts sillä on joku hahmo. Hiukkanen -> .

Timo: Hiukkanen on tietty partikkeli. Voi olla lepomassaa tai ei kuten esim fotoni jolla on laskennallisesti todettavissa liikemassa. Hiukkasella voi olla sähkövaraus tai ei. Hiukkasten elinikä vaihtelee erittäin lyhyistä ajoista pysyviin rakenteisiin (<- huom " normaaleilla energioilla"). Kuvaillaan eri yhteyksissä eri merkinnöillä. mystinen.

### **4. Energiapakkaus**

Asko: Hiukkanen on esim. Alfa- beeta-säteilyä tai neutronisäteilyä / protoni, jolloin hiukkasella on massa ja nopeus => energiaa. Hiukkanen on pieni energiapakkaus johon vaikuttaa maan vetovoima.

### **5. Elektroni, protoni, neutroni**

Väinö: Esimerkiksi protoni, elektroni, neutroni.

Veijo: Elektroni, protoni, neutroni.

### **6. Ei vastausta**

Jorma: Ei vastausta

Olavi: Ei vastausta

Tapausopiskelijoiden ja –opettajien elektronimallien ominaisuuksia

Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muut käsitykset on luokiteltu omiin käsityksiin, vaatimattomiin käsityksiin ja klassisiin käsityksiin.

#### PAIKKAAN LIITTYVÄT

P1 Elektroneihin voidaan liittää paikan käsite. (Elektronin paikka on olemassa)

P2 Oma käsitys: elektronit ovat lokalisoituvia. (Elektronit ovat hyvin paikallisia)

P3 Oma käsitys: kun elektroni on laatikossa, sen paikka tunnetaan tarkasti. (Elektroni voidaan laittaa laatikkoon, jolloin sen paikka tunnetaan tarkasti)

P4 Oma käsitys: elektronien paikka on vaikea määrittää. (Elektronien paikka on vaikea sanoa / elektronien hetkellinen paikka on vaikea määrittää)

P5 Oma käsitys: Schrödingerin yhtälön ratkaisuna saatava aaltoyhtälö kuvaa elektronin paikkaa. (Aaltoyhtälö kuvaa elektronin paikkaa ja saadaan Schrödingerin yhtälön ratkaisuna)

#### TILA

**T1: Elektronilla on tietty tila/energiatila**

**T2: Elektronit ovat atomissa energiatioilla**

#### PAIKAN TODENNÄKÖISYYTEEN LIITTYVÄT

TN1 Oma käsitys: energiatasot voidaan ymmärtää orbitaaleina, joissa elektronit todennäköisimmin sijaitsevat

TN2 Vaatimaton käsitys: elektroni sijaitsee jossain tietyllä todennäköisyydellä

3 TN5 Vaatimaton käsitys: elektronin esiintymisellä on tn-jakauma

4 TN7 Vaatimaton käsitys: aaltomekaniikka antaa tn-jakauman elektronin sijainnista

**5 TN3 Elektroni sijaitsee atomissa tietyllä todennäköisyydellä jossain alueessa**

**6 TN4 Elektroniverhot kuvataan sumun kaltaisina alueina, joissa elektroni jollakin tn:llä sijaitsee**

7 TN6 Elektronin paikan jossain voi ennustaa jollakin tarkkuudella, sille saadaan todennäköisyysjakauma

#### LIIKKEESEEN LIITTYVÄT

R1 Oma käsitys: elektronit liikkuvat suurilla nopeuksilla

R2 Oma käsitys: elektronien etenemissuunta muuttuu esim. kaksoisraoissa

R3 Klassinen käsitys: Elektronien liike / metallin vapaiden elektronien liike on sähkövirtaa

R4 Klassinen käsitys: elektroneilla on liikerata sähkökentässä

R5 Klassinen käsitys: Elektronit kiertävät ydintä atomissa

R6 + 7 Oma käsitys: elektronit liikkuvat suurilla nopeuksilla energiatasoilla / elektronien kiertäessä atomissa ne voivat olla vain tietyillä [energia]tiloilla



#### AALTOLUONTEESEEN LIITTYVÄT

A1 Oma käsitys: elektronin aallonpituus saadaan aaltoliikkeen perusyhtälön avulla

**A2 Elektronisuihkulla saadaan samanlainen interferenssikuvio kuin näkyvällä valolla**

#### OMA KÄSITYS: AALTOMALLI

AM1 Ei-klassinen aaltomalli kuvaa elektronin liikettä

AM2 Ei-klassinen aaltomalli kuvaa elektroni-verhoa

AM3 Ei-klassinen aaltomalli kuvaa elektronia

#### DE BROGLIEN TEORIA

**BR1 Elektronin aallonpituus saadaan aineaaltoteorian / de Broglien hypoteesien avulla**

**BR2 Elektronin taajuus saadaan aineaaltoteorian / de Broglien hypoteesien avulla**

**BR3 Elektronin aineaallonpituus eli de Broglien aallonpituus on kertaluokkaa  $10^{15}$  m**

#### OMA KÄSITYS: DUALISMI

DM1 Oma dualismi: hiukkasen massa vastaa jotakin aaltoa, massa voi olla myös säteilynä

#### DUALISMI

D1 Vaatimaton käsitys: aalto- ja hiukkasluonne mainittu / merkitys epäselvä

**D2 Aalto- ja hiukkasluonne liittyy ilmiöihin esim. diffraktio [kaksoisrakokoe] ja törmäykset**

**D3 Elektronin aaltoluonne eli aalto-ominaisuudet voidaan havaita kaksoisrakokokeessa. Elektronilla on myös hiukkasluonne eli hiukkasominaisuudet kuten massa ja varaus**

#### HEISENBERGIN EPÄTARKKUUSPERIAATE

H1 Oma käsitys: Heisenbergin epätarkkuusperiaate kertoo tarkkuuden, jolla elektroni on määritelty hiukkasena

**H2 Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen mukaan elektronin paikka on epätarkka**

**H3 Heisenbergin epätarkkuusperiaate liittyy elektronin liikemäärän epätarkkuuteen**

**H4 Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen mukaan elektronin ja fotonin paikkaa ja liikemäärää ei voida tuntea tarkasti (kaava mainittu)**

#### OLEMUS

O1 = O2 Oma käsitys: Elektronilla on fyysinen koko

O2 = O1 Oma käsitys: Elektronilla on fyysinen koko, joka on mitattavissa massasta johtuen

O3 Elektroni on pistemäinen

**O4 Elektroni on rakenteeton**

**O5 Elektronilla saattaa olla sisäinen rakenne**

O6 Oma käsitys: elektronilla on sisäinen rakenne

Tapausopiskelijoiden ja –opettajien fotonimallien ominaisuuksia.

Tieteellisen käsityksen mukaiset ominaisuudet on lihavoitu. Muut käsitykset on luokiteltu omiin käsityksiin, vaatimattomiin käsityksiin ja klassisiin käsityksiin.

#### LIKEMASSA

M1 Oma käsitys: liikemassa mainittu

M2 Oma käsitys: voidaan laskea massan ja energian yhteyden avulla

#### ENERGIA JA LIKEMÄÄRÄ

**E1 Fotonilla on tietty energia**

**E2 Fotonin energia on  $E = hf$**

P1 Vaatimaton käsitys: fotonin liikemäärä mainittu

P2 Oma käsitys: fotonin liikemäärä on verrannollinen (liike)massaan

P3 Oma käsitys: suunnattu liikemäärä =  $mc$

P4 Fotonin liikemäärä on  $p = h/\lambda$

#### HIUKKASLUONTEESEEN LIITTYVÄT

**H1 Fotoni on sm-säteilyn / valon hiukkasluonne**

**H2 Fotoni kuvaa valon hiukkasluonnetta**

H3 Oma käsitys: fotonilla ei ole hiukkasluonnetta

H4 Vaatimaton käsitys: fotonilla on hiukkasluonne / -ominaisuudet

#### AALTOLUONTEESEEN LIITTYVÄT

A1 Oma käsitys: fotoni on aaltoliikettä

A2 Oma käsitys: fotonit ovat poikittaista aaltoliikettä

A3 Oma käsitys: fotonilla on aalto-ominaisuus; esim. näkyvä valo on tasoaalto

A4 Oma käsitys: ei-klassinen aaltomalli kuvaa fotonin sijaintia

A5 Vaatimaton käsitys: fotonilla on aaltoluonne/aalto-ominaisuuksia

#### DUALISMI

D1 Oma käsitys: fotoni on sekä hiukkanen että aaltoliikettä

D2 Oma käsitys: Fotoni tarvitaan valon dualistisen eli aalto- ja hiukkasluonteen vuoksi; aaltoluonne = fotonilla on valon ominaisuuksia, kuten sähkö- ja magneettikentät

D3 Vaatimaton käsitys: fotonilla on aalto- ja hiukkasominaisuudet / -luonne

D4 Hiukkas- ja aaltoluonne voidaan havaita kaksoisrakokokeessa ja Comptonin ilmiössä / diffraktio (kaksoisrakokoe) ja törmäykset

#### RAKENNEOSAMALLI

R1 Klassinen käsitys: fotoni on valohiukkanen

R2 Klassinen käsitys: valo / sm-säteily koostuu fotoneista / on sm-säteilyä

R3 Oma käsitys: valo koostuu (valo)aalloista eli fotoneista

R4 Oma käsitys: fotonit ovat energian kuljettaja: ne kuljettavat valokvantteja, energiaa tai valoa

#### VÄLITTÄJÄHIUKKANEN

V1 Oma käsitys: fotoni on sm-säteilyn / valon välittäjähiukkanen

V2 Oma käsitys: fotoni on sm-säteilyn välittäjähiukkanen eli välittää tiedon jostain asiasta johonkin toiseen paikkaan

V3 Oma käsitys: fotoni on energian välittäjä, se kuvaa energian olemusta sm-säteilyssä

V4 Oma käsitys: fotoni on energiansiirron mekanismi

**V5 Fotoni on sm-vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen**

**V6 Fotoni välittää sm-vuorovaikutusta eli energiaa**

**V7 Valo on aaltoliikettä ja sen vuorovaikutus aineen kanssa tapahtuu fotoneina**

#### OLEMUS

O1 Oma käsitys: fotoni on todellinen, koska se ilmenee aineen ja säteilyn vuorovaikutuksessa

O2 Oma käsitys: fotoni kuvaa vuorovaikutustapahtumasta saatavaa tietoa

O3 Oma käsitys: fotoni on malli valon kuvailemiseen / valon kulun selittämiseen

O4 Fotoni on malli, jonka avulla selitetään tiettyjä ilmiöitä / jolla selitetään sm-ilmiöiden syntyä ja käyttäytymistä

#### SYNTYMINEN JA KUOLEMINEN

SK1 Oma käsitys: fotoni häviää levossa

SK2 Oma käsitys: fotoni lakkaa olemasta vuorovaikutuksessa

SK3 Oma käsitys: syntyminen & kuoleminen 2: fotoni voi muuttaa muotoaan: sen energia muuttuu esim. Elektronin liike-energiaksi ja irrotustyöksi VS-ilmiössä

SK4 Syntyy emissiossa ja kuolee absorptiossa

#### HEISENBERG

**HB1 Heisenbergin epätarkkuusperiaate liittyy paikan epätarkkuuteen**

**HB2 Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen mukaan fotonin paikkaa ja liikemäärää ei voida tuntea tarkasti (kaava mainittu)**