

# Foorumi



#7

## MUISTOKIRJOITUS

Pedro Echenique  
Risto Nieminen

### Philip W. Anderson: monipuolinen ja poikkeuksellinen tiedemies

**Philip Warren Anderson**, PWA, oli 1900-luvun jälkipuoliskon suurimpia teoreettisia fyysikkoja. Hän kuoli 29.3.2020 96 vuoden ikäisenä. Phil Anderson syntyi 13.12.1923 Indianapolisissa Yhdysvalloissa ja varttui Urbanassa, Illinoisissa vakaassa akateemisessa, mutta Andersonin mukaan ”rahattomassa” perheessä. Phil Anderson valmistui Harvardista ja oli lyhyen jakson toisen maailmansodan aikana Yhdysvaltain laivaston laboratoriossa antennija rakentamassa. Hän palasi Harvardiin ja suoritti tohtorin tutkinnon **John H. Van Vleckin** ohjauksessa. Anderson siirtyi Bell-puhelin-yhtiön tutkimuslaboratorioon (”Bell Labs”), missä hän oli suuren osan urastaan, jakaen aikansa Bellin ja Cambridgen yliopiston Cavendish-laboratorion välillä vuosina 1967–1975 (hän oli aiemmin ollut Churchill Collegen *Overseas Fellow* vuonna 1962) ja myöhemmin Bellin ja Princetonin yliopiston välillä (1975–1984). Hän siirtyi

kokonaan Princetonin professuuriin vuonna 1984 ja jäi emeritukseksi 1997. Hän jatkoi aktiivista työtään lähes kuolemaansa asti.

Pienimpien ja suurimpien mittakaavojen fysiikalla on erityinen, äärimmäisyyksiin liittyvä viehätöksensä, joka kiehtoo kauneudellaan, syvyydellään ja salaperäisyydellään. *Kondensoituneen aineen fysiikka* on yhtä kiehtova ja vähintään yhtä kaunis: se pyrkii ymmärtämään monimutkaisuuden äärettömyyttä ja sitä kautta ”tavallisten” fysikaalisten objektien todellista luonnetta. Tämän alueen teoreettisen tutkimuksen, jolle Anderson omisti elämänsä (unohtamatta muille fysiikan alueille suuntautuneita retkiä, joiden joukossa on mm. Higgsin mekanismin tunnistaminen), viehätökseen liittyy tinkimätön vaatimus sopusoinnusta kokeellisten tulosten ja todellisuuden kanssa. Phil Anderson oli kondensoidun aineen fysiikan jättiläinen, joka antoi myös nimen tutkimusalueelleen, muutettuaan (yhdessä **Volker Heinen** kanssa) Cambridgen *Solid State Theory* -ryhmän nimeksi *Condensed Matter Theory* (TCM). Hänen originelli, syvälinen ja intuitiivinen lähestymistapansa, usein eri näkökulmista, muutti suuresti aiempaa tutkimuskäytäntöä ja puoltaa hänestä käytettyä termiä ”Dean of Condensed Matter Physics”.

Andersonin aikalaisia Bell-laboratoriossa, missä hän teki monet ensimmäisistä urauurtavista töistään, olivat mm.

**Charles Kittel**, jota Anderson piti kiinteän olomuodon mestarina, sekä transistorin keksijä **William Shockley**, jota Anderson ihaili intellektuaalina. Anderson oli aina ylpeä työstään ja vuosistaan Bell-laboratoriossa. ”Olimme hyvin itsetietoisia, mutta siihen oli perusteita. Noina vuosina keksimme modernin teknologian”.

## Tieteelliset saavutukset

Andersonin tieteelliset saavutukset ovat innoittaneet useita fyysikkosukupolvia. Monet niistä ovat Nobel-palkinnon arvoisia: antiferromagnetismi, *superexchange*, vahva ja heikko lokalisatio, Kondo-ilmiö, spinlasit, resonantti valenssidos, ortogonaalisuuskatastrofi, Higgsin mekanismi, <sup>3</sup>He-suprajuoksevuus, korkean lämpötilan suprajohteet jne. Phil Anderson jakoi vuoden 1977 fysiikan Nobel-palkinnon kollegansa **Sir Nevill Mottin** ja väitöstyönsä ohjaajan Van Vleckin kanssa ”magneettisten ja epäjärjestyneiden systeemien elektronirakenteen teoreettisesta tutkimuksesta”.

Monet Andersonin läpimurroista liittyivät ajankohtaisiin aiheisiin, ja niiden kohdalla tunnustus tulee jakaa usealle henkilölle. Toisaalta monet, kuten lokalisatio ja spinlasit, ovat pääasiassa Andersonin ansiota. Tässä kirjoituksessa tyydymme lyhyesti kuvaamaan hänen tärkeimpiä saavutuksiaan sekä muita, kenties vähemmän tunnettuja kontribuutioita hänen ydinalueensa ulkopuolella.

## Antiferromagnetismi

**Lev Landau** toi symmetriarikon käsitteen kondensoituneen aineen fysiikkaan osoittaen, että diskreetin symmetrian muutoksesta seuraa termodynaaminen faasimuutos. Vuoden 1952 artikkelissa Anderson kuvaa antiferromagnetismin uudenlaisena symmetrian rikkoutumisena, jossa perustila ei ole edes Hamiltonin operaattorin ominaistila, toisin kuin ferromagnetismin tapauksessa mutta

samoin kuin suprajohtavuuden tapauksessa. Sekä ferro- että antiferromagnetismissä perustila rikkoo Hamiltonin operaattorin täyden symmetrian, mistä seuraa Goldstonen moodien (spinaaltojen), massattomien eksitaatioiden olemassaolo, yleisenä seurauksena jatkuvan symmetrian spontaanina rikkoutumisena.

Anderson osoitti ensimmäisenä (1952), että jatkuvan symmetrian rikkoutumiseen liittyy välttämättä massaton bosoni. Tämä johtuu siitä, että symmetrian palautumiseen vaaditaan amplitudiltaan divergoiva ja energialtaan häviävä nollapisteen liike. Anderson osoitti myös, että koska antiferromagneetin Néel-perustila ei ole ominaistila, tarvitaan dynaaminen symmetrian palautuminen. Hän kuvaili sille efektiivisen Hamiltonin operaattorin ja arvioi, että symmetrian palautumisaika on vuosia. Tämä varhainen artikkeli, Andersonin sanoin, ”sisältää kaikkien myöhempien symmetriarikkoo ja Goldstonen moodeja koskevien ideoideni siemenen, samoin kuin mikroskooppisen ja mesoskooppisen fysiikan yhteyden”.

## Superexchange

Elektronien identtisydestä johtuva vaihtovuorovaikutus (*exchange*) on ferromagneettinen ja liittyy metallisuuteen, kuten **Werner Heisenberg** ensimmäisenä osoitti. Useimmat magneettisia ioneja sisältävät eristeet ovat kuitenkin antiferromagneettisia. **Hans Kramers** selitti tämän johtuvan siitä, että transitiometalli-ionien vajaan *d*-kuoret sitoutuvat diamagneettisten ionien kanssa (esim. Mn-O-Mn). *Superexchange* on nimi mekanismille, jossa toisistaan etäällä

olevien atomien spinit kytkeytyvät, kun niiden aaltofunktiot menevät päällekkäin niiden välissä olevien atomien aaltofunktioiden kanssa. Happi on silta mangaanin *d*-orbitaalien väliselle vuorovaikutukselle. Tämän välittää tila, jonka energia on korkea elektronien välisen repulsion takia. Andersonin työ 1950-luvulla kulmineituu vuoden 1959 artikkeliin, jossa hän kuvaa mekanismin yksityiskohtaisesti, arvioi termin voimakkuuden ja vertaa sitä neutronisironnattauksiin. Kramers-Anderson-mekanismi on materiaalfysiikan klassikko, joka ilmenee yleisesti ferriiteissä, transitiometallioksidoissa, fluorideissa jne.

## Lokalisaatio

Andersonin tunnetuimpia tuloksia on hänen vuoden 1958 ennustuksensa, että vapaat elektronitilat voivat lokalisoitua, jos elektronit liikkuvat potentiaalitentässä, jonka epäjärjestys on riittävän suuri. Partikkelin liike kiinteässä potentiaalissa kuviteltiin asiaksi, josta kaikki tiedetään. Liikkeen pysähtyminen epäjärjestyksen johdosta on oiva esimerkki emergenssinä tunnetusta ilmiöstä. Harva fyysikko (Anderson itse kyllä, mutta ei Sir Nevill) oivalsi asian merkityksen. Vuoden 1958 artikkeli, jota Anderson luonnehti ”more profound than clear”, jäi aluksi huomiotta: se sai vuoteen 1968 mennessä vain 30 viittausta. Myöhemmin Anderson totesi sen olevan ”more quoted than read”. Siihen on nyt jo lähes 9000 Web of Science -viittausta.

1970-luvun lopulla ”Gang of Four” (Anderson, Abrahams, Licciardello, Ramakrishnan) esitti lokalisaatiomallin,

joka perustuu johtavuuden käyttäytymiseen systeemin koon ja dimension funktiona, ja yhdisti sen Thoulessin johtavuuteen. He esittivät mekanismin lokalisaation ilmestymiselle epäjärjestyksen kasvaessa ja mahdollistivat kokeellisesti testattavat ennusteet.

Lokalisaation käsite liittyi aluksi elektronien liikkeeseen, mutta se voidaan yleistää myös muihin aaltoihin. Se on yleinen aalto-optiikassa ja jopa valtameren aalloissa, joiden aallonpituudet ovat kilometrejä. Monet pitävät vuoden 1958 artikkelia Andersonin tärkeimpänä kontribuutiona sen yleisen tieteellisen merkityksen takia. Anderson itse, kenties ajatellen mieliprojektiaan Santa Fe -instituuttia (josta lisää myöhemmin), taisi asettaa etusijalle spinlasitutumuksen monipuolisuuden ja impaktin.

## Magneettiset momentit

1960-luvulla Anderson esitti metallien magneettisille epäpuhtauksille nimeään kantavan mallin, johon hän tiivisti mm. **Jacques Friedelin** ja **André Blandinin** esittämiä ideoita. Andersonin malli sisältää Mottin metalli-eriste-transition ja mielenkiintoisia yhteyksiä Kondon malliin. Andersonin ja Kondon mallit vaikuttivat myös renormalisaatioryhmäideoiden kehitykseen ja numeeriseen soveltamiseen. Kysymys lokaalien magneettisten momenttien syntymisestä, vaikka käsitteellisesti erilainen kuin elektronien lokalisaatio, on kuitenkin siihen yhteydessä, kuten Anderson huomautti Nobel-luennossaan. Lokalisaation ja momentin tasapainottuminen edellyttää elektronien kulkua

useiden polkujen kautta. Tilannetta kuvasi 1800-luvun matemaatikko **Charles Dodgson** (tunnetaan kirjailijanimellä **Lewis Carroll**), jonka kirjassa Kuningatar toteaa Liisalle, että hänen maassaan ”on juostava kovaa pysyäkseen samassa paikassa”.

## Spinlasit

Anderson tutki yhdessä **Sir Sam Edwardsin** kanssa vuorovaikuttavia spinsysteemejä käyttäen yksinkertaista Hamiltonin funktiota, jossa vuorovaikutusten etumerkki ja voimakkuus vaihtelevat satunnaisesti. Työ on Andersonin arvostetuimpia ja kauaskantoisimpia.

Vuosina 1988-1990 Anderson kirjoitti *Physics Today* -lehteen yhteensä seitsemän kolumnia spinlaseista, osoitti niihin liittyvän teorian vaikeusasteen sekä alleviivasi, kuinka aluksi vähäpätöiseltä näyttänyt kokeellinen havainto, terävä piikki magneettisten metalliseosten susceptibiliteetin lämpötilariippuvuudessa, on paljastanut yhteydet koko joukkoon näennäisesti erillisiä ongelmia matematiikassa, tietojenkäsittelytieteessä, neuroverkoissa ja hajautetuissa muisteissa, proteiinien laskostumisessa sekä yleisemmin kaikissa tilanteissa, joita dominoi satunnainen frustraatio ja kilpailu eri konfiguraatioiden välillä. Spinlasien teoria on innoittanut myös ison joukon käyttökelpoisia menetelmiä koneoppimisessa ja optimointitehtävissä.

Spinlasitutkimuksen aikana 1970-luvun puolivälissä Cambridgen professori Sam Edwards oli British Science Research Councilin (silloin SRC) puheenjohtaja ja matkusti Lontooseen päivittäin. Junamat-

kan aikana hän työskenteli spinlasien parissa, samoin kuin monissa SRC:n kokouksissa, joissa hän näytti tekevän muistiinpanoja, kun itse asiassa työsti spinlaseja käsitteleviä muistiinpanojaan. Joka lauantai Anderson ja Edwards tapasivat Cavendishin TCM-kahvihuooneessa ja keskustelivat tutkimuksen seuravista askelista muiden TCM:n jäsenten kuunnellessa. Lauantaiset aamusessiot tarjosivat harvinaisen mahdollisuuden ja etuoikeuden seurata huippuajattelijoiden lämminhenkistä keskustelua.

## Suprajohtavuus. Suprajuoksevuus. Higgsin mekanismi

Anderson sai laajalti tunnustusta **John Bardeenin** ohella suurena suprajohtavuuden specialistina. Hänen ansiotaan on mm. teoria, joka selittää suprajohtavuuden vähäisen herkkyyden ei-magneettisille epäpuhtauksille.

**John Bardeen, Leon Cooper ja Robert Schrieffer** julkaisivat vuonna 1957 BCS-teorian, joka selittää monissa metalleissa havaitun suprajohtavuuden. Tämä työ kuuluu 1900-luvun fysiikan suuriin saavutuksiin. Phil Anderson oivalsi heti BCS-teorian tärkeyden, ja laajensi sen sellaisiin suprajohtaviin faaseihin, joiden symmetriat poikkeavat alkuperäisen teorian oletuksista. Vuonna 1960 **Peter Morelin** kanssa julkaistu työ loi myöhemmin pohjan  $^3\text{He}$ -supranestefaasiin identifioinnille Cornellin yliopistossa ja Teknillisessä korkeakoulussa.  $^3\text{He}$ -supranesteellä on nollamagneettikentässä kaksi faasia. B-faasi on stabiili matalassa

lämpötilassa ja paineessa, ja sillä on isotrooppinen energia-aukko. A-faasi stabiloituu korkeammassa lämpötilassa ja paineessa, ja sillä on kaksi energia-aukon nollakohtaa. Kahden faasin olemassaolo indikoi, että  $^3\text{He}$  on epätavallinen supra-neste, sillä kaksi faasia edellyttää, että mittasymmetrian lisäksi toinenkin symmetria on rikkoutunut.

**Brian Josephson** osallistui jatko-opiskelijana Andersonin luennoille Cambridgen yliopistossa, ja sai idean ohuen eristekeherroksen toisiinsa liittämistä suprajohteista. Tämä johti Josephsonin julkaisemaan artikkeliin, joka ennustaa myöhemmin monia sovelluksia saaneet Josephson-ilmiöt. Anderson innosti kollegansa **John Rowellin** Bell-laboratoriossa verifioimaan ilmiöt kokeellisesti.

Anderson käytti myös BCS-teoriaa analysoimaan suprajohteiden kollektiivisia eksitaatioita. Hän osoitti, että toisin kuin muissa faasimuutoksissa suprajohtavuuteen liittyvä symmetriarikko ei johda matalaenergisiiin eksitaatioihin. Suprajohteessa symmetriarikko johtaa kollektiivisen aaltofunktion vaiheen valintaan (mittasymmetria). Symmetriaan liittyvä kollektiivinen muuttuja on elektronien lukumäärä. Suprajohteen kollektiiviset eksitaatiot ovat varattujen elektronien oskillaatioita, joiden synnyttäminen vaatii aallonpituudesta riippumattoman minimienergian, plasmonin energian. Tämä on yhteistä kaikille transitoille, joissa mittasymmetria rikkoutuu ja joissa ei ole pitkän kantaman vuorovaikutuksia.

Suprajohteen sisällä ei ole magneettikenttää. Tämä Meissner-ilmiö osoittaa, että suprajohteen sisällä sähkömagneettisen vuorovaikutuksen kantama on lyhyt, ikään kuin fotonilla olisi äärellinen massa. Anderson osoitti epärelativistista kenttä-

teoriaa käyttäen, että elektronitiheyteen kytkeytyneet fotonit muuttuu massalliseksi. Jo vuoden 1958 artikkelissaan hän toteaa, että ”varatulla Fermi-kaasulla ei ole matalaenergisiiä kollektiivisiä moodeja vahvojen plasmavaikutusten takia, kun taas neutraalilla kaasulla on”.

Vuonna 1963 Anderson oivalsi, että suprajohtavuudesta löytynyt massan generoitumisen ilmiö voidaan yleistää hiukkasfysiikkaan. Ilmiö tunnetaan nykyisin yleisesti nimellä Higgsin mekanismi. Se on tärkeä osa **Sheldon Glashown, Steven Weinbergin** ja **Abdul Salam**in formuloimaa hiukkasfysiikan standardimallia. *Physical Review Letters* -artikkelissaan vuonna 1964 Peter Higgs toteaa, että ilmiö, jossa mittabosoni saa massan symmetriarikon kautta ”on vain relativistinen analogia plasmoni-ilmiölle, jolla Anderson on osoittanut, kuinka neutraalin suprajohtavan Fermi-kaasun massattomat eksitaatiot muuttuvat longitudinaalisiksi äärellisen massan plasmoneiksi, kun kaasu on varattu”. Anderson arvosti Higgsiä, joka toistuvasti tunnusti hänen alkuperäisen kontribuutionsa.

Korkean lämpötilan suprajohtavuus löydettiin vuonna 1987. Andersonin ilmiötä koskeva teoria oli **Linus Paulingin** resonoivien valenssidosten ideoiden inspiroima. Alun perin Anderson sovelsi tätä käsitettä Mott-eristeisiin, joissa kvanttifluktuaatiot tuhoavat pitkän kantaman antiferromagneettisen järjestyksen. Hänen työnsä viittasi perustilaan, joka on kvanttispinneste. Andersonin ideat ovat johtaneet aktiiviseen kvanttimaterian tutkimukseen, vaikka korkean lämpötilan suprajohtavuuden selityksenä ne eivät ole saaneet hänen muun työnsä tapaista laajaa hyväksyntää.

## Tieteen ideat: emergenssi

Fysiikan tutkimuksen lisäksi Anderson pohti laajasti ja syvällisesti tieteen yleisiä kysymyksiä ja kirjoitti niistä elegantisti. Monet hänen esseistään on koottu kirjaksi *More and Different. Memories of a Thoughtful Curmudgeon* (World Scientific 2011). Alla on joitain mainintoja hänen jättämistään merkeistä.

Anderson oli kiinnostunut emergenssistä. Vaikka tämä sana ja käsite juontaa juurensa 1800-luvun biologiaan, Andersonin lyhyt kolumni *Science*-lehdessä vuonna 1972 avasi uuden tien ajatella, kun se esitti, vastoin reduktionistisia yksinkertaistuksia, uuden näkemyksen siitä, mikä on tieteessä fundamentaalista. Näkemys voidaan lyhyesti summeerata: uudet fundamentaaliset konseptit piirtyvät esiin, kun tarkastelemme ilmiöitä kompleksisuuden eri tasoilla.

Kaikki luonnontieteilijät hyväksyvät reduktionistisen hypoteesin, mutta se ei implikoi konstruktionistista hypoteesia. ”Se, että kaikki voidaan redusoida yksinkertaisiksi fundamentaaleiksi laeiksi ei tarkoita sitä, että voimme lähteä noista laeista ja rekonstruoida universumin.” Lakien yksinkertaisuus ja symmetria eivät ilmene niiden seurauksissa, kun symmetria on rikkoutunut. Kokonaisuus on paljon enemmän ja hyvin erilainen kuin osiensa summa. Vanhakantaisen marxismin termein määrä muuntuu laaduksi, tai kuten Anderson itse kuvaa käyttäen kehystenä **Scott Fitzgeraldin** ja **Ernst Hemingwayn** 1920-luvulle ajoitettua dialogia nyt jo myyttiseksi muuttuneen *Science*-artikkelinsa loppulauseena:

Fitzgerald: ”The rich are very different from us”.

Hemingway: ”Yes, they have more money”.

Äärimmäistä reduktionismia, jota kuvaa **Paul Diracin** lause ”the rest is chemistry”, ei tunneta vain teoreettisten hiukkasfyysikkojen joukossa. Eräät molekyylibiologit päättivät aikoinaan yrittää redusoida koko ihmisen organismin ja olemuksen, sairauksista kauneuden tajuun tai uskonnollisiin tunteuksiin, ”vain kemiaksi”.

Reduktionismi luonnontieteen menetelmänä on aikaansaanut mullistavia tuloksia. Hiukkasfysiikan standardimalli on universaalin kulttuurin suuria tuloksia, jonka Anderson ymmärsi ja jota hän ihaili. Hän kutsui standardimallia ”yhdeksi ihmiskunnan suurimmista saavutuksista”. Anderson ei kritisoi reduktionistista ohjelmaa vaan eräitä siitä johdettuja asenteita, jotka asettavat ”kaiken teorialle” aseman jumalaisena yhtälönä ja josta kaikki tieto on suoraan johdettavissa. Andersonille ja monelle muulle maailma on hierarkia tasoja, joita erottelevat emergenssin kerrokset siten, että kukin taso on intellektuaalisesti erillinen alla olevasta.

Andersonin omin sanoin: ”On olemassa monia tasoja, ja kognitiivinen etäisyys etiikasta DNA:han on pidempi kuin DNA:sta alkeishiukkasiin. Reduktionismin todellinen arvo on siinä, että se yhdistää tieteen intellektuaalisesti ja vahvistaa sen perustusta, mutta sillä ei ole arvoa ohjelmana, jolla pyritään täysin ymmärtämään luontoa”.

**Yoichiro Nambu** kiteytti vastaan-ottaessaan Nobel-palkintoa Chicagon yliopistossa (hän oli sairauden takia estynyt saapumasta Tukholmaan) emergenssin ytimen briljantisti: ”Spontaanin symmetriarikon periaate on avain sen

ymmärtämiseen, miksi maailma on niin kompleksinen, vaikka sitä oletetusti kuvaavat peruslait ovat monella tapaa symmetrisiä. Peruslait ovat hyvin yksinkertaisia, mutta kuitenkin maailma ei ole tylsä, mikä on mielestäni ideaalitalanne”.

Emergenssin prosessi on avain 21. vuosisadan tieteeseen. Voidaan ennustaa, että emergenssi, ei **Leon Ledermanin** ”jumalhiukkanen” tai **Steven Weinbergin** ”lopullinen teoria”, dominoi tulevaisuutta.

Anderson oli innostuneesti mukana Santa Fe -instituutin Complexity Science -ohjelmissa, **David Pinesin, George Cowanin, Murray Gell-Mannin, Keith Arrown** ja monen muun seurassa. Hän osoitti käytännössä, että mitä kokeneempi ja osaavampi tiedemies on, sitä vähemmän hän uskoo, että hänen ammattitaitonsa kattaa kaiken tarvittavan. Santa Fe -instituutin onnistuminen sai hänet kehumaan, että ”uskomme omistavamme älyllisen poreilun maailmanennätyksen”.

Emergenssi voi ilmetä monin tavoin ja vaikuttaa monilla alueilla, ja Anderson puolsi vahvasti tarvetta käydä ”naapuri-laaksoissa vuoristoteiden kautta”. Nämä tiet ovat usein oikoteitä oman laaksomme tuntemattomiin osiin tai oman tietemme alueisiin, joita emme näe laaksostamme. Anderson kuitenkin kritisoi Bell-laboratoriossa ”Taran-ilmionä” tunnettua fyysikoiden kaikkivoipaisuuden tunnetta, jonka vallassa nopeasti sovellamme mallejamme uusiin ongelmiin, ilman että maltamme riittävästi analysoida uuden alueen kompleksisuutta, yksityiskohtia ja dataa.

## Tieteen objektiivisuus, luonnon ymmärtäminen

Monien muiden tieteilijöiden tavoin Anderson vastusti vahvasti kulttuurista relativismia tieteessä. Tiede perustuu näkemykseen, että on olemassa tieteellinen totuus, joka on sama kaikille, rodusta, ideologiasta tai vakaumuksista riippumatta, ja että tämä totuus voidaan löytää rationaalisen havainnoinnin kautta. Hyväksymme maailman objektiivisen todellisuuden ja sen, että se on sama kaikille. Tämä on vastoin auktoriteetteihin perustuvia argumentteja ja abstrakteja intellektuaalisia konstruktioita, olivatpa nämä kuinka briljantteja tahansa. Tiede on empiirinen asia ja fysiikka on kokeellinen tiede. Sen fundamentaalinen tavoite ei ole matemaattinen eleganssi, vaan kyky ymmärtää ympäröivän maailman totuus. **Michael Faradayn** kokeellisia havaintoja ja nykyhetken ”säieteologiaa” tulisi kriittisesti vertailla. **Edward Wittenin** painokasta lausahdusta ”supersäieteoria on liian kaunis ollakseen väärä” tulisi verrata Faradayn kauniiseen lauseeseen laboratoriopäiväkirjassaan 18.3.1849: ”Mikään ei ole liian ihmeellistä ollakseen totta”. Kaiken on oltava luonnonlakien mukaista, ja ratkaiseva testi ovat toistettavat kokeet. ”Nullius in verba” (”ei kenenkään sanoin”), kuten kuuluu Royal Societyn motto.

Andersonille avain luonnon ymmärtämiseen eivät ole pitkä ja monimutkaiset laskelmat, vaan ilmiöiden takana olevien mekanismien ymmärtäminen. Nobel-luennossaan hän toteaa, että yksinkertaistetut mallit voivat valottaa ongelmaa paremmin kuin monimutkaiset laskut. Tehtävämme



on viime kädessä ”ymmärtää luontoa, ei toistaa sitä”.

Kondensoituneen aineen fysiikka, muun tieteen lailla, yrittää ymmärtää ongelmien oleelliset piirteet. Hyvän mallin tulee olla riittävän yksinkertainen ollakseen ratkaistavissa ja riittävän kompleksinen kertoakseen jotain oleellista. Tämä alleviivaa approksimaatioiden tärkeyttä. Iso osa tieteestä ja kondensoituneen aineen fysiikasta on approksimaatioiden taitoa.

## Superconducting Super Collider

Anderson ei kaihtanut vastakkainasettelua eikä piilotellut mielipiteitään, kun näki niille tarvetta. Hän osallistui julkiseen keskusteluun vastuullisena kansalaisena. Hän vastusti presidentti **Ronald Reaganin** *Star Wars* -ohjelmaa, kuvaten sitä sanoin ”spherically stupid”, typerä kaikista suunnista katsottuna. Toinen hyvin tunnettu ja kontroversiaalinen tapaus on hänen *Superconducting Super Collider* (SSC) -hanketta kohtaan esittämänsä kritiikki. Tässä hän asettui vastatusten hyvin järjestyneen hiukkasfysiikan yhteisön kanssa ja kohtasi monet hankkeen johtajista sen rahoitusta julkisesti vastustavana fyysikkona. Hän esitti kritiikkiään selkein interventioin monilla poliittisilla foorumeilla. Tarkoituksemme ei ole ärsyttää kollegoita, joita Andersonin tavoin kunnioitamme ja ihailimme suuresti. Hiukkasfysiikoiden mielipide oli Andersonille (toisin kuin Mottille) tärkeä. **Frank Wilczek** sanoi puheessaan Andersonin 90-vuotispäivänä, että korostamalla symmetriaa ja sen rikkoutumista Anderson auttoi hiukkasfysiikoita näkemään monet

asiat, ei vain selvemmin vaan myös toisella tavalla.

Andersonin ja hiukkasfysiikoiden suhde ei parantunut, kun hän puhuessaan suprajohavuudesta kuvasi osuuttaan seuraavasti: ”Kun antiferromagnetismin esimerkki oli valmistanut ajatteluni, kykenin analysoimaan sen kvanttifluktuaatioita ja näkemään sekä Goldstonen moodien tarpeen että sen miten ne voitaisiin eliminoida. Tämä on se mekanismi, joka nyt kantaa Peter Higgsin nimeä. Hän keksi sen uudelleen hiukkasfysiikoille kelpaavassa muodossa”. Vuonna 2010 Guralnik, Hagen, Kibble, Brout, Englert ja Higgs saivat teoreettisen hiukkasfysiikan Sakurai-palkinnon. Anderson ei ollut palkittujen joukossa.

Esiintymisessään 20.3.1990 USAn edustajainhuoneen energiakomiteassa Anderson sanoi tyypillisellä suorudellaan, että hän oli todennäköisesti ensimmäinen, joka ymmärsi Higgsin mekanismin ja Higgsin bosonin, hiukkasen, jonka rakennettava SSC- kiihdytin joko havaitsisi tai sitten ei. Hän väitti siten itsellään olevan perspektiiviä siihen, oliko Yhdysvalloille tärkeätä investoida kahdeksan miljardia dollaria vahvistaakseen yhden hänen teorioistaan, kun ilmeisesti kongressilla ei ollut halua investoida muutamaa kymmentä miljoonaa dollaria toisen hänen teoriasensa perustutkimukseen (hän tarkoitti korkean lämpötilan suprajohteita).

Phil Andersonin julkinen vastustus ja poliittinen aktivismi SSC:n rakentamista vastaan yllätti monet. Kuten hän eräässä puheessaan kysyy, ”kuinka voi tiedemies, joka on kontribuoinut kiihdyttimessä testattavien teorioiden syntyyn, vastustaa sen rakentamista?” Vastustuksellaan hän haastoi kaksi hankalasti poistettavaa tabua: pelon tulla leimatuksi filistealaiseksi ja

pelon julkisesti vastustaa rahan käyttämistä tutkimukseen, koska tiedemiehelle rahan käyttäminen tieteeseen on määritelmän mukaan hyvä asia. Mutta Anderson vastusti, koska hänen näkemyksensä mukaan tieteen investointien prioriteetit olivat jo ennestään väärät ja epätasapaino eri alojen välillä kasvavasti tuntuvasti SSC:n myötä.

Mikä oli Andersonin todellinen vaikutus SSC:n sulkemiseen? Onnistuiko hän parantamaan muiden alojen rahoitus-tilannetta? Näihin kysymyksiin emme tiedä vastausta. Totuus on, että SSC-projektin alasajo siirsi kokeellisen hiukkasfysiikan painopisteen Eurooppaan, mikä kulminoitui Higgsin bosonin havaintoon CERNissä vuonna 2012. Englert ja Higgs saivat fysiikan Nobel-palkinnon ja yhdessä CERNin kanssa Prince of Asturias -palkinnon vuonna 2013. Sen perusteluissa todetaan, että ”ihmiskunta kokosi Euroopan johdolla voimansa ymmärtääkseen”.

Andersonin argumentit eri fysiikan alojen tärkeydestä erilaisille spin-off-soveluksille ovat usein toistettuja tutkimusrahoituksesta keskusteltaessa. Eräs hänen puheistaan päättyy johtopäätökseen: ”Dollareissa mitattuna kondensoituneen aineen fysiikka on synnyttänyt monen miljardin verran enemmän liiketoimintaa (kuin hiukkasfysiikka), ja voin rehellisesti luvata näin käyvän jatkossakin.”

Mielestämme ei ole tarpeen (vaikka se voi olla avuksi) käyttää spin-off-toimintaa puolustamaan perustutkimuksen rahoituksen tärkeyttä millään alueella. Tieteen kulttuuriseen arvoon vetoamisen tulee olla riittävä peruste valistuneessa yhteiskunnassa. Modernin tieteen välinearvo toisinaan hämärtää sen kulttuurista merkitystä. Vähättelettä muiden kontribuutioiden merkitystä moderni

tiede on ihmiskunnan tärkein kollektiivinen kulttuuriteko. Se on klassisen humanismin huippu ja riemuvoitto. Perustutkimuksen kulttuurista merkitystä kuvaa mainiosti **Robert Wilsonin** vastaus Yhdysvaltain senaattori **Pastoren** kysymykseen hiukkaskiihdyttimen merkityksestä kansalliselle puolustukselle. ”Sillä ei ole mitään tekemistä maanpuolustuksen kanssa, paitsi että se tekee maastamme puolustamisen arvoisen.”

## Tiede ja yhteiskunta

Anderson aloitti Cambridgessä yhdessä Volker Heinen ja **Richard Edenin** kanssa kurssin ”Science and Society” vuonna 1974. Kurssi ei käsitellyt vain yleisiä tieteen kysymyksiä vaan myös sen epistemologiaa ja ennen kaikkea kulttuurisia, yhteiskunnallisia ja taloudellisia seurauksia.

**G.H. Hardy** on sanonut syitä haluta tieteentekijäksi moninaisiksi ja kompleksisiksi. Tieteen tekeminen vaatii älyllistä uteliaisuutta, halua löytää totuus, jonka uskoo olevan olemassa. Se vaatii myös käsitylöläisiin vertautuvaa ammattiyllpeyttä, halua tehdä asiat hyvin. Muita syitä ovat vallan ja rahan tavoittelu sekä varsinkin tärkeänä maineen ja kunnian tavoittelu. Andersonin sanat kurssilla tekivät nuoriin jatko-opiskelijoihin vaikutuksen: ”Tiede on verifioitavan informaation vaihtamista tunnustukseen ja arvostukseen.”

COVID-19-kriisi korosti terveen tieteen ja tiedepolitiikan tarvetta, joille Andersonin mukaan on kaksi edellytystä: politiikkojen jatkuvuus sekä luottamus hallintoon ja yhteistyö sen kanssa. Päivänpolttavat tarpeet johtavat joskus lyhyt-näköisiin ratkaisuihin, joiden seuraukset

voivat olla arvaamattomat. On tärkeää korostaa pitkän aikavälin kehitystä, jota turvaavat vakaat ja kattavat sopimukset. Kehitys tieteessä ei ole taattua. Sen mahdollistaa yhteiskunnan pitkäjänteinen, vaalittu tuki.

Hyvä yhteistyö hallinnon kanssa auttaa välttämään tehotonta byrokratiaa. Byrokratian koukeroita voidaan perustella korruption välttämiseksi, vastuullisuudella ja tehokkuudella julkisten varojen käytössä. Nämä ovat hyviä tavoitteita, mutta niihin sovellettavia instrumentteja tulee soveltaa viisaasti ja visionäärisesti. Tutkijoiden ja hallinnon välinen yhteistyö on tarpeellinen ja terveellinen hyvän tiedepolitiikan toteuttamiselle.

Maailma on globaali ja nopeasti muuttuva, ja tieteeseen perustuva päätöksenteko on avoimen yhteiskunnan välttämätön edellytys. Riippumaton tiedeneuvonta on pitkän aikavälin kestävän kehityksen kivijalka. Tulevat sukupolvet kohtaavat suuria ja vaikeita ongelmia. Tehtävämme on taata, että niillä on niiden kohtaamiseen tarvittavat käsitteelliset ja materiaaliset edellytykset. Tämä tarkoittaa solidaarisuutta tulevaisuudelle tieteen ja koulutuksen resursoinnin muodossa.

Politiikat, jotka jättävät huomiotta tieteellisen tiedon tai toimivat sitä vastaan, tulee hylätä. Tieteen tulee olla oleellinen osa päätöksenteossa. Tiedemiehet eivät tee monimutkaisia poliittisia päätöksiä, jotka vaativat useiden näkökulmien tarkastelua, vaan heidän tehtävänsä on tarjota tietonsa käytettäväksi. Tätä voi kuvata **Winston Churchillin** kyynisellä huomautuksella **Niels Bohrille** toisen maailmansodan aikana: ”Scientists should be on tap, not on top.”

## Moderni tiede

Phil Anderson varoitti tieteellisissä urissa viime vuosina tapahtuneista muutoksista. Julkaisuista on tullut enemmän urakehitystä ohjaava mittari kuin aidosta uteliaisuudesta kumpuava tieteellisten tulosten kommunikointikanava. Tiede näyttäytyy usein eliittuurheiluna, jossa se, kellä on eniten ”high impact”-lehdissä julkaistuja tuloksia, voittaa. Harva pitää tästä kilpailusta, mutta olemme kaikki pakotetut osallistumaan siihen rahoituksen varmistamiseksi. Kuitenkin tiede, toisin kuin eliittuurheilu, sallii kaikkien voittavan luontoa ymmärtämään pyrkivän yhteistyön kautta.

Lyhyessä esseessään Anderson kysyy purevan ironisesti, olisiko kvanttimekaniikka voitu kehittää tämän päivän Amerikassa. Hänen vastauksensa on kielteinen. **Werner Heisenbergin** olisi pitänyt kirjoittaa vuodessa 10–15 artikkelia vanhasta kvanttiteoriasta saadakseen rahoitusta eikä **Erwin Schrödinger** olisi koskaan saavuttanut sellaista tuottavuuden tasoa, joka olisi taannut pysyvän työpaikan.

## Mies neron takana

Phil Anderson oli syvälinen ajattelija, ahkera lukija, joka kirjoitti elegantisti, säkenöivä intellektuelli omalla alallaan ja sen ulkopuolella. Kirjan *More and Different* artikkelit ovat näkemyksellisiä ja kauniita: kirja-arvioita, profileja hänen idoleistaan kuten **Lev Landau**, **Fritz London** ja **Lars Onsager**. Joidenkin mielestäni Anderson oli ihmisenä hankala, mutta meille hänet tunteneina tämä oli epätarkka havainto.

Anderson tuki aina humanistista manifestia, järjen ohjaamaa, myötäelämisen inspiroimaa sekä kokemuksen ja tiedon tukemaa humanismia. Hän oli militantti, joka puolusti rationaalisuutta ja valistuksen ajan arvoja. Hän ilmaisi asian näin: ”Aikamme suuri konflikti on yhtäältä valistuneen kulttuurin, toleranssin, humanismin ja yksilön kunnioittamisen ja toisaalta kuluttavan, dogmaattisen ja fundamentalistisen kulttuurin välillä, sekä idässä että lännessä”.

Anderson oli suuri persoona, joka kykeni auttamaan monia hienovaraisesti ja anteliaasti. Hän oli hyvä opettaja, joka korosti tieteen olevan ennen muuta luovaa työtä eikä sitä voida välittää metodina tai reseptinä. Paras tapa oppia on tehdä sitä yhdessä niiden kanssa, jotka osaavat.

Phil Anderson oli myös kompleksinen persoona, jota oli helpompi ihailta kuin matkia. Hänen omintakeiseen ja intuitiiviseen ajatteluunsa yhdistyi vahva tekninen osaaminen. Hän kykeni kaivamaan esille ongelman ydinkohdat, usein uudesta perspektiivistä. Hänen vaikutuksensa fysiikan tutkimuksessa tulee näkymään pitkään. Anderson oli suuri tiedemies, oivallinen ihminen ja vastuullinen kansalainen. Kuten hän itse sanoi **Ryogo Kubosta**: ”Oli etuoikeus tuntea hänet”.

Kirjoittajat

### Risto Nieminen

Risto Nieminen on Aalto-yliopiston fysiikan professori (emeritus) ja tieteen akateemikko.

### Pedro Echenique

Pedro Miguel Echenique on Baskimaan yliopiston (UPV/EHU) fysiikan professori San Sebastianissa ja Donostia International Physics Center (DIPC) -tutkimuskeskuksen perustaja ja johtaja. Hän on myös toiminut Baskimaan autonomisen alueen opetusministerinä.

Echenique ja Nieminen olivat yhtäaikaan jatko-opiskelijoita Cambridgen yliopiston Cavendish-laboratoriossa 1970-luvulla.



Kirjoittajat Cambridgessä vuonna 1975