

”Satunnaisesta topologista” tuli nobelisti Perustutkimus pääsi parrasvaloihin

■ Vuoden 2016 kemian ja fysiikan Nobelin palkinnot myönnettiin molekyyli- ja atomitason rakenteisiin ja ilmiöihin liittyvistä töistä. Suomalaiset professorikollegat kiittävät valintoja ja tähdentävät perustutkimuksen merkitystä uuden löytämisessä.



Jari Koponen

Michael Kosterlitz on Nobelin palkinnostaan iloisen hämmentynyt. ”Eihän tällaiseen osaa mitenkään varautua.”

Jari Koponen

Tieto fysiikan Nobelistasta tuli **Michael Kosterlitzin** kännykkään erikoisessa paikassa, espoolaisen kauppakeskuksen parkkihallissa.

Yhdysvaltalaisen Brownin yliopiston skottisyntyinen tutkija oli matkalla ruokatunnille suomalaisen kollegansa, Aalto-yliopiston professorin **Tapio Ala-Nissilän** kanssa.

Sushilounas syötiin, mutta sen jälkeen puhelin on soinut herkeämättä ja tuore nobelisti joutunut sellaiseen mediapyöritykseen, että heikompaakin jo hirvittäisi.

Niin itse asiassa hirvittää Kosterlitziaakin. Tiedemiehen tuskastunut luonnehdinta jaloissa pyörivistä toimittajista ja heidän *human interest*-uteluistaan kantautuu vahingossa korviini sovittua tapaamista odotellessa.

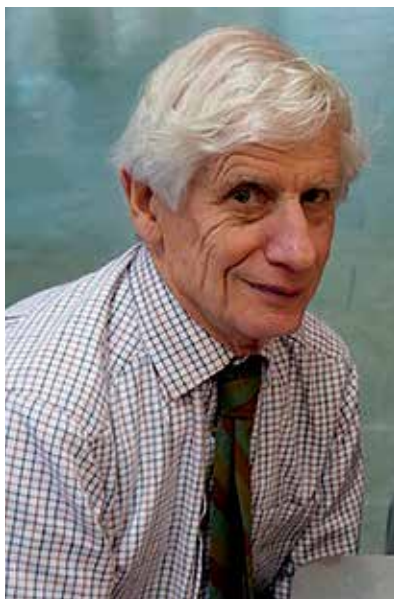
Aallon neuvotteluhuoneen hämärässä tutkija kuitenkin rentoutuu ja kohta suorastaan innostuu, kun haastattelu keskittyykin hänen työhönsä eikä nuoruuteensa tunnettuna vuorikiipeilijänä. Seuraavat kolme varttia hän kertoo tutkimuksistaan seikkaeräisesti.

Alkajaisiksi pitää silti kysyä, mikä on vetänyt oman tieteenalansa huiipun juuri Suomeen.

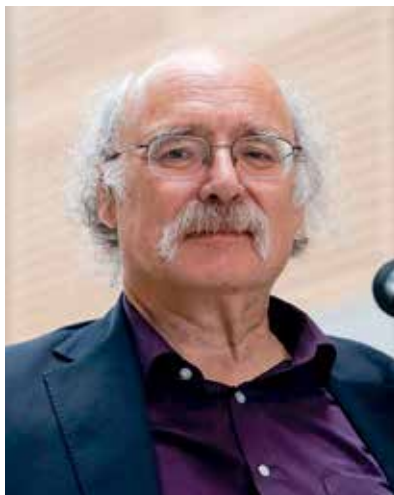
”Tapio Ala-Nissilä”, Kosterlitz hymyilee.

”Tutustuin häneen, kun hän oli jatko-opiskelijana Brownissa vuodet 1988–1991. Olemme siitä lähtien pitäneet yhteyttä.”

Tällä kertaa Kosterlitz viettää Aalto-yliopistossa pari kuukautta vieraillevana tutkijana. Takana on monta visiittiä Suomeen, myös Helsingin yliopistoon, jossa Ala-Nissilä aiem-



Washingtonin yliopiston emeritusprofessori **David Thouless** on syntymään skotti, kuten myös **Michael Kosterlitz**.



Lontoosta kotoisin oleva **Duncan Haldane** työskentelee Yhdysvalloissa **Princetonin yliopistossa**.

min työskenteli.

”Tapiolla on aktiivinen tutkimusryhmä, joka perehtyy mielenkiintoi-

siin fysiikan ongelmiin. Tänne on aina helppo tulla, ja viihdyn täällä erinomaisesti.”

Kosterlitz on osallistunut useisiin suomalaisiin tutkimushankkeisiin. Uusin niihin liittyvä, nestefaasin kiinteytymistä käsittelevä julkaisu ilmestyi viime keväänä. Lisäksi hän pitää seminaareja ja kursseja sekä ohjaa jatko-opiskelijoita.

Tutkittavaa riittää huippupalkinnon jälkeenkin. Kosterlitzia hämmästyttää, kuinka paljon fysiikan perusteissakin on vielä tekemistä.

Kvanttimekaniikka on jo sata vuotta vanha tiede, mutta yhä löytyy uusia selitettäviä asioita. Jopa jokapäiväisissä ilmiöissä on alueita, joita ymmärretään varsin huonosti.

”Vieläkään ei ole esimerkiksi pyörteisen virtauksen selittävää teoriaa, vaikka tasaisen virtauksen teoria on hallinnassa.”

Ultrakylmää topologiaa

Kvanttimekaaniset ilmiöt tulevat esiin ultrakylmissä lämpötiloissa, lähellä absoluuttista nolapistettä. Neste nousee kitkatta yli säilytysastian reunan, ja metalli menettää kokonaan sähkövastuksen.

Tällaisten ilmiöiden ymmärtämisen ja hyödyntämisen kannalta on oleellista, että ne voidaan selittää teoreettisesti.

Juuri siihen Kosterlitz ja kaksi muuta tämänvuotista fysiikan nobelistia, **David Thouless** ja **Duncan Haldane**, ovat paneutuneet.

Kolmikkoo yhdistää se, että he ovat käyttäneet töissään matemaattisen topologian käsitteistöä ja avanneet oven kokonaan uudelle tutkimusalueelle,

Jatkuu sivulla 17 >>>

Kahvikuppi vai munkkirinkilä?

Topologia voidaan yleistajuisesti määritellä matematiikan alueeksi, joka tutkii geometristen kappaleiden sellaisia ominaisuuksia, jotka eivät muutu kappaleen uudelleen muovailussa. Tällöin kappaletta voidaan taivuttaa, painaa kasaan ja vääntää ilman, että kappale rikkoutuu tai siitä poistetaan tai siihen lisätään materiaalia.

Havainnollistava esimerkki topologisesta muunnoksesta on kahvikupin muuntaminen munkkirinkiläksi. Kummastakaan ei niissä olevan reiän vuoksi voida muodostaa palloa, joka on topologisesti erilainen kappale.

Havainnollistuksesta on jäänyt anekdootiksi matemaatikko **John Kelley** (1916–1999) tokaisu: ”Topologi on matemaatikko, joka ei erota kahvikuppia munkkirinkilästä.”



Sebastian Huber / EHT Zürich

Kemian Nobelit molekyylikoneiden uranuurtajille

Kemian Nobelin palkinnon vastaanottavat keinotekkoisten molekyylikoneiden kehittelyn uranuurtajat Jean-Pierre Sauvage, Fraser Stoddart ja Bernard Feringa.

Jari Koponen

Ranskalainen emeritusprofessori **Jean-Pierre Sauvage** teki palkitun työnsä Strasbourgin yliopistossa ja skotlantilainen **Fraser Stoddart** Northwestern-yliopistossa Yhdysvalloissa. Hollantilaisen **Bernard Feringan** työpaikkana on Groningenin yliopisto.

Sattumoisin myös kemian nobelistit ovat ”topologeja”, sillä yksi heidän tutkimusalueensa nimitys on topologinen kemia. Vielä vakiintumaton termi viittaa kolmiulotteisten toiminnallisten rakenteiden luomiseen yksittäisistä orgaanisista molekyyleistä. Sinänsä sillä ei ole mitään tekemistä matemaattisen topologian kanssa.

Kaikki elävän luonnon toiminnot perustuvat ympäristön ja toistensa kanssa vuorovaikuttaviin molekyyli-



Fraser Stoddart kehitti rotaksaanimolekyyleihin perustuvan muistipiirin.



Jean-Pierre Sauvage löysi metallikate-naanit ja avasi tien molekyylikoneille.

koneisiin. Nobelistien tutkimusalue kytkeytyy siten myös elämän perustekijöihin.

Kuten niin usein tieteen historiassa, sattumalla oli tälläkin kertaa osuutensa tutkimuksen käynnistymiseen.

Kun Jean-Pierre Sauvage 1980-luvun alussa tutki valoherkkiä molekyylikomplekseja, hän löysi niistä kaksi kupari-ionin ympärille ketjuuntunutta molekyylirengasta. Katenaaneiksi kutsutut molekyylit koostuvat kahdesta tai useammasta toisiinsa mekaanisesti kytkeytyneestä molekyylistä.

Sauvagen havainto johti kokonaan uuden molekyyliryhmän eli metallikatenaanien löytämiseen. Niiden avulla katenaanien synteesistä tuli huikean paljon helpompaa ja nopeampaa kuin aiemmin.

Katenaaneissa rengasosat voivat liikkua toistensa suhteen, ja liikettä voidaan hallita monin eri keinoin. Näin tie oli auki varsinaisten molekyylikoneiden rakentamiseen.

Sauvage esitteli ensimmäiset yksinkertaiset mekaaniseen liikkeeseen perustuvat toiminnalliset molekyylit vuonna 1994. Hän onnistui saamaan toisen renkaan pyörittämään hallitusti edestakaisin kaksirenkaisessa

katenaanissa. Liikkeen mahdollisti systeemiin heikosti sidotun kuparionin sähkökemiallinen hapetus-pelkistysreaktio.

Samana vuonna Stoddart puolestaan demonstroi edestakaisen suoraviivaisen liikkeen rotaksaanimolekyylissä, jossa molekyylirengas liikkuu kahden paikan välillä akselina toimivassa molekyylissä. Hallittu liike saadaan tässäkin systeemissä aikaan hapetus-pelkistysreaktiolla tai pH:n muutoksella.

Molekyylikoneita rakennettaessa sekä katenaaneja että rotaksaaneja voidaan käyttää esimerkiksi kytkin-elementteinä.

Pohjana perustutkimus

Jyväskylän yliopiston kemian laitoksen akatemiaprofessorille **Kari Rissaselle** Jean-Pierre Sauvage ja hänen työnsä ovat tuttuja jo pitkältä ajalta.

”Tutustuin häneen 1990-luvun loppupuolella”, kertoo Rissanen, joka on sittemmin tutustuttanut myös muita suomalaisia kemian tutkijoita ja opiskelijoita Sauvagen tutkimuksiin.

Rissanen kutsusta Sauvage vieraili Jyväskylässä vuonna 2002 pitämässä molekyylikoneista kesäkurssin. Vuonna 2008 hän esitteli koneiden kehitystyötä Nanotiedepäivillä, Jyväskylän yliopiston vuosittain isännöimässä nanotutkimuksen tapahtumassa.

”Varsinaisen tutkimusyhteistyön Sauvagen kanssa käynnistimme vuonna 2006.”

Yhteistyö tarkoitti, että kun katenaaneja ja rotaksaaneja syntetisoitiin Sauvagen laboratoriossa Strasbourgin, niiden rakenteet määritettiin röntgendiffraktiometrisesti Jyväskylässä.

Röntgendiffraktiomenetelmällä saadaan varmuus molekyylin rakenteesta sillä edellytyksellä, että tutkittava molekyylit voidaan kiteyttää.

Kumppanukset esittelivät töidensä tulokset yhteensä kuudessa julkaisussa vuosina 2007–2011.

Samaan aikaan, kun Kari Rissanen iloitsee tutkimuskumppanin Nobelistia, häntä harmittaa perustutkimuksen asema nyky-Suomessa.

”Tämänhetkinen poliittinen ilmapiiiri on meillä sellainen, että ensi sijalla on soveltava tutkimus. Perustutkimus ei kuitenkaan voi sitoutua sovellusten tuottamiseen”, akatemia-professori painottaa.

Toisen nobelistin kanssa yhteistyötä tekevä Aalto-yliopiston Tapio Ala-Nissilä on samaa mieltä.

”Nobelit myönnettiin puhtaalle perustutkimukselle. Tälle viestille soisi löytyvän ymmärrystä Suomessakin. Tiederahoituksesta päättävien pitäisi huomioida tutkijayhteisön palaute ja viesti”, hän toivoo.

Ala-Nissilä myös muistuttaa tieteen perimmäisestä ideasta.

”Tieteen tehtävänä ei ole palvella vain teollisuuden tuotekehitystä vaan löytää ja tutkia jotain aivan uutta. Toki työstä voidaan parhaimmillaan ehkä myöhemmin johtaa uusia ja mullistavia sovelluksia”, Ala-Nissilä sanoo.

Kari Rissanen mukaan pelkästään soveltavan tutkimuksen suosiminen aiheuttaisi pidemmällä aikavälillä korvaamatonta vahinkoa.

”Perustutkimus myös kouluttaa ihmisiä ajattelemaan ja etsimään uusia ratkaisuja. Mihin tulevaisuuden innovaattoritkaan pohjaisivat työnsä, jos heillä ei olisi lähteenä ja tukena perustutkimusta?”, Rissanen ihmettelee.

Moottori ja muistipiiri

Kemian tuoreista nobelisteista myös Bernard Feringa teki perustutkimusta. Hän vei molekyyliin pyörimisliikkeen hallinnan uudelle tasolle. Feringan vuonna 1999 esittelemä rengasmolekyyli saadaan valon avulla pyörimään yhteen suuntaan suurella nopeudella.

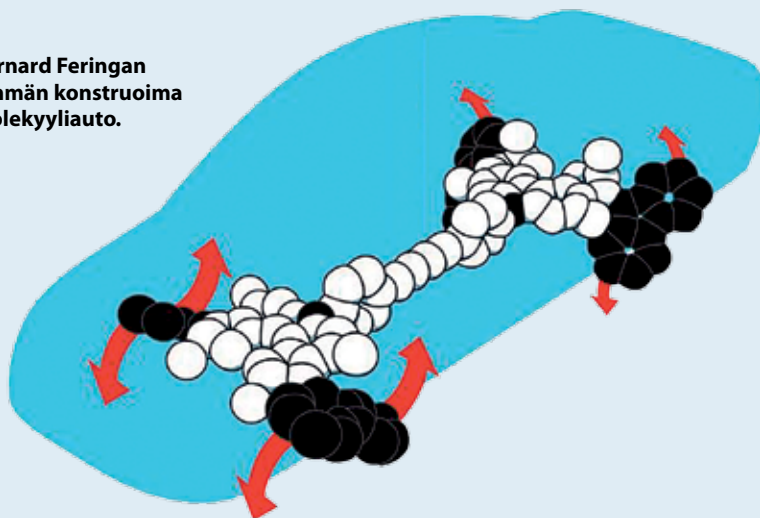


Bernard Feringa rakensi historian ensimmäisen nelipyöräisen nanoauton.

Saavutus perustuu kekseliääseen molekyyliarakenteeseen. Sen muodostavat kaksi litteää molekyyliin osaa, jotka ovat vahvalla kaksoisdoksella keskiosiltaan kiinni toisistaan.

Ultraviolettivalopulssi avaa renkaan yhdeltä sivulta ja panee sen pyörimään puoli kierrosta. Prosessissa vapautuva lämpö hitsaa uuden konfiguraation paikalleen, joten liike ei ole palautuva. Uusi valopulssi jatkaa liikettä toisen puolikierroksen, lämpö palauttaa alkuperäisen konfiguraation, ja sykli voidaan uusia. Näin

Bernard Feringan ryhmän konstruoima molekyyliauto.



Johan Jamestad/Ruotsin tiedeakatemia

►►► Sivulta 15...

topologisen kiinteän aineen fysiikalle.

Ensimmäisinä topologiaan tarttuivat Kosterlitz ja Thouless. Ohuissa, kylmissä, oleellisesti kaksiulotteisissa pinoissa ei ajateltu voivan tapahtua mitään olomuodon muutosta. Tietyt

kokeelliset havainnot kuitenkin kaipaivat selitystä.

”Kun rakensimme ultrakylmien systeemien teoriaa, David huomasi jossain vaiheessa, että olimme hyödyntäneet eräitä topologiaan kuuluvia ajatuksia”, Kosterlitz muistelee.

Feringa oli luonut ensimmäisen molekyyliin moottorin.

Vuonna 2011 Feringan ryhmä esitelti moottoriin perustuvan nelipyöräisen nanoauton, joka liikkui tasaisella pinnalla. Kolme vuotta myöhemmin optimoitu moottori pyöri jo huimaa 12 miljoonan kierroksen sekuntivauhtia.

Fraser Stoddart taas demonstroi vuonna 2007 rotaksaaneihin perustuvan muistipiirin. Moottoria, nanoautoa ja muistipiiriä voidaan pitää ensimmäisinä varsinaisina molekyyliilaitteina.

Tätä nykyä molekyylikoneita kehitetään laajalti, ja alan julkaisuissa on kuvattu kymmenittäin erilaisia molekyyliilaitteita.

Tutkimusalueen painopiste onkin jo siirtymässä laitteiden valmistuksesta niiden käyttämiseen, joskin voitettavana on vielä monta ongelmaa.

Yksittäisillä molekyylikoneilla ei ole käyttöä kuin korkeintaan laboratoriodemonstraatioina. Sen sijaan on opittava hallitsemaan miljardien laitteiden toimintaa koordinoitusti niin, että ne tuottavat halutun makroskooppisen toiminnon. Se voi olla esimerkiksi keinoliikkeen liike.

Lisäksi tarvitaan toiminnan yksinkertaisia ja käytännöllisiä kontrolli- ja ohjauskeinoja. Laitteiden täytyy myös kestää lukemattomia työsyklejä.

”David on perehtynyt topologiaan syvästi. Hän kykeni siksi muotoilemaan teoriaa niin, että pienen skaalan topologiset pintailmiöt tulivat esiin.”

Kosterlitzin tietämän mukaan kyseessä on pioneerityö, jossa topolo-

►►►

Taloustieteen palkinto Bengt Holmströmille



Suomalaisilla on tänä vuonna erityinen syy istua television ääreen, kun Nobel-juhlallisuuDET 10. joulukuuta käynnistyvät Tukholmassa.

Ruotsin keskuspankin perustaman, kuningas **Kaarle Kustaan** luovuttaman taloustieteen palkinnon astelee vastaanottamaan **Bengt Holmström**, joka saa tunnustuksen ensimmäisenä suomalaisena ekonomistina.

Holmström jakaa palkinnon Har-

Bengt Holmström ehti olla Nobel-veikkailujen kohde jo pitkään.

vardin yliopistossa työskentelevän **Oliver Hartin** kanssa. Kaksikko palkittiin niin sanotun sopimusteorian kehittämisestä.

Helsingissä vuonna 1949 syntynyt Holmström opiskeli alun perin matematiikkaa, josta hän suoritti kandidaatin tutkinnon kotikaupunkinsa yliopistossa. Jatko-opintoihin Holmström lähti Atlantin taa ja väitteli taloustieteiden tohtoriksi Stanfordin yliopistossa Kaliforniassa.

Kansainvälistä arvostusta nauttiva Holmström on toiminut vuodesta 1994 maineikkaan MIT-yliopiston professorina.



gian käsitteistöä sovellettiin fysiikassa ensimmäisen kerran.

”Minä en ole matemaattisen topologian ekspertti, joten itseäni pidän lähinnä satunnaisena pioneerinä”, Kosterlitz naurahtaa.

Teoriaansa kokonaan uudentyypisestä topologisesta muodonmuutoksesta Kosterlitz ja Thouless esittivät vuonna 1973. Teorian mukaan ultrakylmille pinnoille muodostuu pyörteen ja antipyörteen pareja, jotka tietyssä korkeammassa kriittisessä lämpötilassa irtautuvat toisistaan.

Vuosina 1977–1978 teoriaa laajensivat **David Nelson** ja **Bertrand Halperin**. Laajennetun teorian ansiosta **D. J. Bishop** ja **J. D. Reppy** kykenivät tulkitsemaan kokeellisesti tutkimensa ohuen helium-4-supraneste-kerroksen käyttäytymistä ja totesivat sen teorian mukaiseksi.

Kosterlitz–Thouless-siirtymä on sittemmin osoittautunut yleispäteväksi ilmiöksi, joka on havaittu kokeellisesti monissa erilaisissa fysikaalisissa systeemeissä.

Tehokas sateenvarjo

David Thouless sovelsi topologista menetelmää toiseenkin selitystä vaatineeseen kysymykseen, vuonna 1980 löydettyyn kvantti-Hall-ilmiöön.

Ilmiö tulee esiin, kun elektronit loukutetaan hyvin ohueen puolijoh-

derakenteeseen, kvanttikaivon, joka jäähdytetään lähelle absoluuttista nolapapistettä ja asetetaan voimakkaaseen magneettikenttään.

Kun rakenteeseen kytketään virta, kvanttikaivon ohuen johdinosan vastusarvo nousee yksikkövastuksen suuruusina portaina sitä mukaa kuin magneettikentän suuruutta nostetaan.

Thoulessin vuonna 1982 julkaisema teoria selitti ilmiön. Lisäksi se ennusti, että virta kulkee vain johteen molemmilla reunoilla vastakkaisiin suuntiin ja että elektronit liikkuvat siroamatta epäpuhtausatomeista. Molemmat ennusteet vahvistettiin myöhemmin kokeellisesti.

Nykyisin kvantti-Hall-ilmiötä käytetään hyväksi vastuksen primaarin mittanormaanin luomisessa.

Duncan Haldane puolestaan tutki tahollaan teoreettisesti yksiulotteisia atomiketjuja. Ne muodostuvat atomeista, joiden spin on joko parillinen tai pariton.

Haldanen vuonna 1983 tekemän teoreettisen ennusteen mukaan kaikkien ketjun atomien spinien ollessa parillisia ketju on topologinen. Tällöin topologisuus ilmenee ketjun päissä analogisesti kaksiulotteisen tason kanssa, jossa topologisuus ilmenee tason reunoilla. Hämmästyttävä tulos sai kokeellisen vahvistuksen kaksi vuotta myöhemmin.

Michael Kosterlitzin mukaan hänen ja Thoulessin alkuperäinen topologiatyökalu oli oikeastaan varsin yksinkertainen. Sittemmin topologia on osoittautunut erittäin tehokkaaksi välineeksi muillekin fyysikoille.

”Se on kuin sateenvarjo, jonka alla voidaan tutkia hyvin suurta määrää erilaisia systeemejä ja ilmiöitä”, Kosterlitz kuvailee.

Nobelitit eivät perustutkijoina miettineet teorioidensa mahdollisia käytännön sovelluksia. Myöhemmin on kuitenkin avautunut uusia, ennen aavistamattomia näköaloja.

Viime vuosina on valmistettu suuri joukko topologiaa eli metamateriaaleja, kuten topologiaa eristeitä, sup- rajohteita ja metalleja. Uusin ja fyysikaltaan oudoin tulokas on Weylin puolimetalli, jonka valmistus onnistui vuonna 2015.

Uusille materiaaleille on jo ideoitu lukuisia sovellusmahdollisuuksia elektroniikassa, ftoniikassa, kvanttietokoneissa ja kvanttisimulaatioissa.

Kosterlitz muistuttaa, että käytännön sovelluksiin on silti matkaa, ”ehkä 10, ehkä 50 vuotta”.

”Mutta tutkimus toki tuottaa jatkuvasti uusia mahdollisuuksia. Luonto ilmiöineen on tyhjentytön, emmekä koskaan edes tule tietämään siitä kaikkea”, nobelisti sanoo. □

Kirjoittaja on kemisti ja vapaa toimittaja.