



Brücke-Osteuropa

Satavuotias suprajohde

hiipii hitaasti kohti huoneenlämpötilaa

■ **Kemian kansainvälisenä merkivuotena 2011 juhlistetaan myös suprajohdeiden ja suprajohdeiden vuosisadan mittaista taivalta.**

Jarmo Wallenius

Suprajohdeala alkoi muovautua fysiikasta keittokemian suuntaan 25 vuotta sitten, kun korkean lämpötilan keraamiset suprajohdeet eli HTC-johdeet keksittiin. Äskettäin eli vuonna 2008 löydettiin rautapohjaiset suprajohdeet.

Nyt eletäänkin suprajohdeiden rauta-aikaa. Uudet materiaalit, jotka ovat eräänlaista teknologiaketjun planktonia, ovat jatkuvasti esillä myös suprajohdeiden alalla.

Hyvä esimerkki on epäpuhtausatomeilla seostettu grafeeni. Kaksiulotteinen hiiliverkko muuttuu epäpuhtausatomien myötä suprajohdeeksi runsaat 11 astetta absoluuttisen nolapisteen eli $-273,15$ celsiusasteen yläpuolella.

Tutkijoiden Graalin maljana on löytää sellainen suprajohde, joka toimisi huoneenlämpötilassa ja olisi helposti muokattavissa, jonka virrantiheys olisi suuri

ja joka kestäisi mahdollisimman hyvin magneettikenttiä. Tavoitetta kohti edetään, mutta hitaasti hiipien.

Kuuden Nobelin johdeet

Suprajohdeiden satavuotinen taival on sekä jäähtymisen että kiinteän aineen ja olomuodon kvanttimekaanisen käyttäytymisen ja ilmiömaailman historiaa.

Saksalainen **Paul Drude** päätteli kolme vuotta elektronin löytämisen (1897) jälkeen, että negatiivisesti varatut partikkelit toimivat johdeissa sähkön kuljettajina. Sähkövastus taas aiheutui elektroni-



Suprajohdemagneettien avulla raiteiden yläpuolella leijuvat junat kiitävät parhaimmillaan lähes 600 kilometrin tuntivauhtia. Suprajohdesovellukset yleistyvät hieman hitaampaa tahtia.

en epäelastisista törmäyksistä kulloisenkin materiaalin värähtelevien atomien kanssa.

Kun hollantilainen **Heike Kamerlingh Onnes** onnistui vuonna 1908 nesteyttämään heliumin (4,2 kelvinasteessa eli -269 celsiusasteessa), otaksuttiin, että resistanssi voi absoluuttista nollalämpötilaa lähestyttäessä hävitä tai epäpuhtausatomien johdosta saturoitua jollekin matalalle tasolle. Kolmas vaihtoehto oli, että vastus alkaisikin metalleissa kasvaa kohti ääretöntä, kun kidehilan kylmät atomit kaappaavat johtavat elektronit itselleen.

Yllätyks oli melkoinen, kun Kamer-

lingh Onnes huhtikuussa 1911 havaitsi, että hyvin puhtaan, kiinteän elohopeametallinäytteen sähkönvastus romahhti kuin veitsellä leikaten nollaan nesteheliumin 4,2 kelvinasteen lämpötilassa. Leidenin yliopiston silloista fysiikan professoria pidetäänkin suprajohdavuuden keksijänä.

Hänelle myönnettiin Nobelin fysiikan palkinto vuonna 1913 lähinnä heliumin nesteyttämisestä ja matalien lämpötilojen koetekniikan kehittämistä. Sitten suprajohdavuuteen liittyvistä ilmiöistä ja teorioista on jaettu Nobel viisi kertaa, viimeksi vuonna 2003.

Suprakaapelia Suomen Porista

Pekingissä elokuussa 2011 pidetyssä matalien lämpötilojen maailmankongressissa LT 26:ssa raportoitiin jo metallisen vedyn hyvästä sähköjohtavuudesta huoneenlämpötilassa. Huoneenlämmössä toimivat todelliset HTC-johteet ovat silti vielä yhtä kaukana kuin fuusioenergia ja kvanttietokone.

Cernin LHC-kiihdyttimen 1 236 perinteistä niobititaanista suprajohdemagneettia toimivat nesteheliumin lämpötilassa, samoin huippunopeat levitöivät magneettijunat. >>>

►►► Kelpoisimmat ja halvimmat suprajohteet valmistetaan yhä niobititaanista, joka otettiin käyttöön jo 40 vuotta sitten. Porilainen Luvata Oy on erikoistunut tuottamaan kuparimatriisin sisään upotettua, niobititaaniseoksesta tehtyä suprajohdekaapelia. Kaapelien on kestettävä sekä korkeita magneettikenttiä että sähkövirtoja.

Niobititaanisiet johteet ovat niin sa-
nottuja toisen lajin suprajohteita. Niis-
sä esiintyy korkeissa magneettikentissä
Meissner-tilan ja normaalin tilan välissä
seka- eli vorteksitila. Siinä suuri mag-
neettikenttä pääsee osittain tunkeutu-
maan suprajohteen sisälle vuoputkia pit-
kin. Tällöin suprajohteessa esiintyy sekä
resistiivisiä että suprajohtavia alueita.

Walther Meissnerin mukaan vuonna
1933 nimetty ilmiö on ääretöntä johta-
vuuttakin käytetympi keino varmistaa,
että materiaali on suprajohtavassa tilas-
sa: suprajohde pyrkii hylkimään ulkoista
magneettikenttää ja toisaalta kenttä saa-
daan poistumaan supratilaan jäähdye-
tystä johteesta. Ilmiötä demonstroidaan
usein suprajohtavan kappaleen yläpuo-
lella levitöivällä magneetilla.

Suprajohtavuuden löytymisen jälkeen
ilmiötä pyrittiin selittämään myös teo-
reettisesti. Ongelmaa yrittivät ratkoa vuo-
sisadan tunnetuimmat teoreetikot **Albert
Einsteinia** ja **Richard Feynmania** myö-
ten. Kattava selitys löytyi kuitenkin vas-
ta vuonna 1957, jolloin **John Bardeen**,
Leo Cooper ja **John Schreiffer** laativat

Supraseoksia jo tuhansia

Suprajohtavuudeksi kutsutaan ilmi-
ötä, jossa sähköä johtavan materiaa-
lin – esimerkiksi metallin, metallise-
oksen, keraamisen kupariyhdisteen
tai orgaanisen aineen – sähkönvastus
häviää tietyn lämpötilan alapuolella.
Lämpötila riippuu kulloisestakin ma-
teriaalista ja paineesta.

Suprajohteiden kriittisiä arvoja
ovat myös kriittinen magneettikenttä
(Meissnerin ilmiö) ja kriittinen virta.
Kullekin aineelle tyypillisten arvojen
alapuolella aine on suprajohtavassa
tilassa. Kriittiseen lämpötilaan liittyy
usein aineen ominaislämmön anomalia.

Jaksollisesta järjestelmästä on löy-
detty 58 alkuainetta, jotka ovat supra-
johteita. Suprajohtavia seoksia ja yh-
disteitä tunnetaan jo tuhansia.

Suprajohteiden korkein toiminta-
lämpötila on vielä hyvin matala, nor-
maalipaineessa 133 ja korkeassa pai-
neessa 138 kelviniä eli –135 celsiu-
sastetta.

Magneettikuvausta ja kaapelointia

Suprajohteiden arkipäivän sovelluk-
set ovat toistaiseksi harvassa. Joka-
päiväisessä käytössä suprajohteet ovat
lähinnä magneettikuvaslaitteissa.
Lisäksi suprajohdekaapeleita asenne-
taan erilaisiin sähköverkkoihin. Yk-
si löytyy New Yorkin Long Islandilta
Holbrookin metroasemalta.

Suprajohdekaapelit ovat vielä viiti-
sen kertaa kalliimpia kuin perinteiset

kuuluisan BCS-teoriansa. Puhelun Tuk-
holmasta he saivat vuonna 1972.

Woodstockin hengessä

BCS-kolmikko oivalsi, että suprajoh-
delämpötilan alapuolella sähkövarausta
kuljettavat elektronit muodostavat joh-
teen kidehilassa löyhästi toisiaan puo-
leensa vetäviä pareja, joita kutsutaan
Cooperin pareiksi.

Pareja muodostuu, kun elektronit vuo-
rovaikuttavat kidehilan kvantittuneiden
värähtelyiden eli fononien kanssa. Co-
operin parin ensimmäinen elektroni ikään
kuin raivaa polkua kidehilan ionisoitu-
neiden hilapisteiden pellossa, ja parin
toinen elektroni seuraa sitä minimoiden
samalla oman energiansa.

Cooperin parien muodostuminen ja
sen myötä makroskooppinen kvanttiko-
herenssi on suprajohteiden universaali
ilmentymä, vaikka elektronien ja fononien
kytkentä ei sellaisenaan kuvaa tark-
asti muita kuin perinteisiä metalli- ja
metalliseosjohteita.

Perinteisten suprajohteiden maksimi-
lämpötila pysytteli 1980-luvulle asti it-
sepintaisesti alle 25 kelvinissä, eivätkä
30 vuotta sitten löydetty orgaanisetkaan
johteet tuoneet parannusta asiaan.

Vuonna 1986 tapahtui kuitenkin läpi-
murto, kun **George Bednorz** ja **Alexan-
der Müller** löysivät IBM:n Zürichin la-
boratoriossa keraamiset, kuparipohjaiset
suprajohteet. He mittasivat lantaani-ba-
rium-kuparioksidin kriittiseksi lämpöti-
laksi 30 kelvinastetta.

Löytö kuumensi kiinteän olomuodon
tutkijat niin, että Amerikan fyysikko-
seuran APS:n seuraavan kevään kokous
sai Woodstockin mittasuhteet. Istuntosa-
lit täytyivät tupaten täyteen, ja debatti
korkean lämpötilan suprajohteista jatkui
kiihkeänä vuorokauden ympäri.

Odotukset vain kohosivat, kun **M. K.
Wu** ja **Paul Chu** havaitsivat yttriumin,
bariumin ja kuparioksidin yhdisteen
muuttuvan suprajohtavaksi tyypin kie-
humispisteen (77 K) yläpuolella 93 kel-
vinasteessa. HTC-taivas näytti YBCO-

kuparikaapelit, sillä suprajohteet tar-
vitsevat vähintäänkin nestetyyppijäh-
dytystä toimiakseen luotettavasti.

Suprajohteilla on kuitenkin tule-
vaisuutensa. Jos kaikki Suomen säh-
könsiirtolinjat korvattaisiin suprajoh-
teilla, energiahävikkiä ei tapahtuisi
lainkaan, ja energiaa säästyisi yhden
ydinvoimalan tuotannon verran.

yhdisteiden jäljiltä valoisalta, ja IBM:n
kaksikko kävi pokkaamassa Nobelit tuo-
reeltaan joulukuussa 1987.

Kuun pimeällä puolella

BCS-teoria kattaa hyvin tavanomaiset
suprajohteet mutta puree huonosti HTC-
materiaaleihin ja muihin eksoottisiin joh-
teisiin. Onkin tapana sanoa, että ”BCS
kertoo kaiken, mutta sen avulla ei löydy
mitään uutta”.

HTC-yhdisteiden toimintalämpötila on
tähän mennessä saatu nostetuksi 138 kel-
vinasteeseen. Ne siis toimisivat sellaise-
naan ilman jäähdytystä Kuun yön puolella.

Perinteisiä suprajohteita hauraammi-
sta HTC-johteista on onnistuttu valmista-
maan hopeakuoreen upotettua suprajoh-
denauhaa ja kaapeleita, mutta vielä
niistä ei ole sovelluksissa niobiyhdistei-
den korvaajiksi.

Kymmenen vuotta sitten löydettiin yl-
lättäen myös uusi perinteinen suprajoh-
de, magnesiumdiboridi, jonka transitio-
lämpötila on 39 kelvinastetta. Anomalia
oli sen ominaislämmön mittauksissa
vuonna 1957 jäänyt huomaamatta.

Vuonna 2008 löydetty raudan erilaiset
yhdisteet, joissa magnetismi ja suprajoh-
tavuus kamppailevat samoista elektro-
neista, ovat uusi epätavallisten suprajoh-
teiden perhe. Niiden korkein muutosläm-
pötila on nykyisin 58 kelvinastetta.

Epätavallisten suprajohteiden teoria on
haaste tämän päivän kiinteän olomuodon
tutkijoille. Cooperin parien syntymeka-
nismia niissä ei tarkoin tunnetta. Kyse voi
fononien sijasta olla esimerkiksi mag-
neettisista värähtelyistä, antiferromag-
netismista tai valenssidoksista.

Apua mekanismin selvittämiseen hae-
taan aktiivisesti kvanttioptiikastakin.
Ultrakylymät alkaliatomihöyryt, joissa
atomien välisiä vuorovaikutuksia ja ve-
tovoimia voidaan manipuloida, näyttävät
sopivan myös suprajohteiden kvanttisi-
mulointiin. □

Kirjoittaja on fyysikko ja tiedetoimittaja.
jarmowallenius@hotmail.com