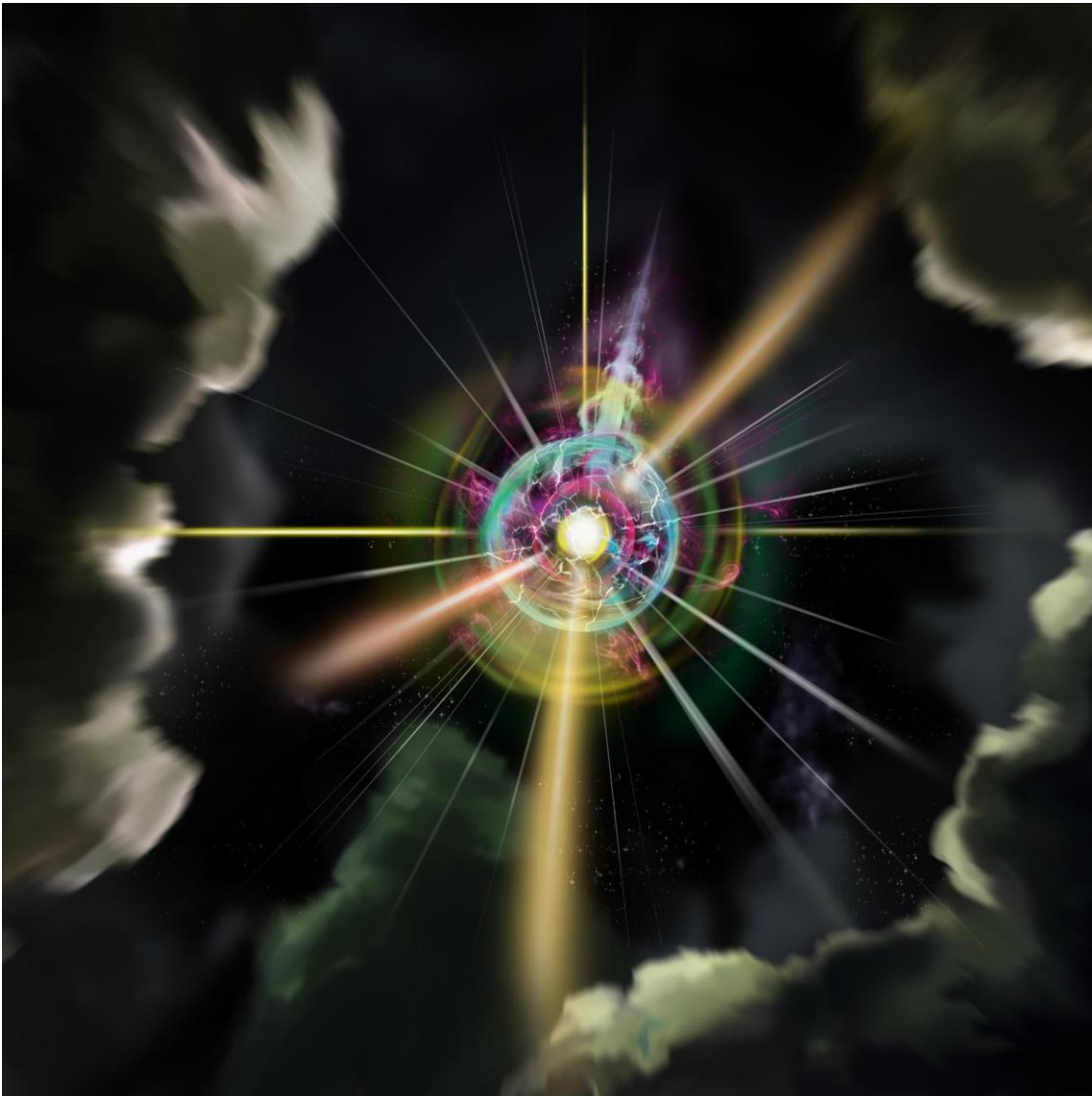


## Tutkijat löysivät kauan etsityn synteettisen hiukkasen

Tutkijat ovat nyt onnistuneet luomaan ja valokuvaamaan laboratorioolosuhteissa synteettisen magneettisen monopolin eli keinotekoisen magneettikentän navan. Tämä tulos on ensimmäinen osoitus siitä, että magneettisen monopolin rakenne esiintyy luonnossa. Aidon magneettisen monopolin löytyminen olisi vallankumouksellinen edistysaskel tieteelle ja teknologialle, kuten elektronin löytyminen oli 120 vuotta sitten. Tutkimustulos julkaistiin juuri tiedelehti *Nature*ssa.



**Kuvateksti:** Taiteellinen näkemys synteettisestä magneettisesta monopolista. [Täysresoluutioinen kuva on linkin takana.](#) (Taiteilija: [Heikka Valja](#))

Vaikka monopolien kvanttimekaaninen rakenne ennustettiin jo 80 vuotta sitten, sitä ei ole koskaan aikaisemmin pystytty havaitsemaan kokeellisesti missään systeemissä. Nyt äärimmäisen kylmään atomikaasuun luotu monopolirakenne on vihdoin valokuvattu.

”Saavutuksemme avaa kvanttitutkimukselle aivan uusia mahdollisuuksia. Osallisuus näin merkittävään läpimurtoon tuntuu uskomattoman hienolta”, iloitsee dosentti **Mikko Möttönen** Aalto-yliopistosta.

Magneettisia monopoleja on etsitty jopa kuukivistä ja ikivanhoista mineraaleista. Cernissä sijaitsevaa miljardien eurojen LHC- hiukkaskiihdyttintä on myös käytetty etsinnöissä, mutta monopoleja ei ole havaittu. Nyt löydetty synteettinen magneettinen monopoli antaa myös näille yrityksille vahvemman pohjan.

”Synteettisen magneettisen monopolin luonti lisää huomattavasti ymmärrystämme aidon magneettisen monopolin olemuksesta”, sanoo professori **David Hall** Amherst Collegesta Yhdysvalloista. ”Ihan joka päivä et pääse tönimään havaitsemattoman alkeishiukkasen vastinetta hallituissa laboratorioolosuhteissa”, hän jatkaa.

”Monopolin syntetisointi on alku kvanttifysiikan tutkimuksen lukuisille uusille läpimurroille. Tulevaisuudessa yritämme saada entistä täydellisemmän vastineen aidolle magneettiselle monopolille,” Möttönen julistaa.

Nykytiedon mukaan magneettinen monopoli on hiukkanen kuten elektronin, mutta sähköisen varauksen sijaan sillä on magneettinen varaus. Kvanttifysiikan kantaisä Paul Dirac keksi runsaat 80 vuotta sitten teoreettisen kvanttimekaanisen rakenteen, joka mahdollistaa magneettisten monopolien olemassaolon. Diracin alkuperäinen rakenne on nyt havaittu kokeellisesti ensimmäistä kertaa.

### **Synteettisen magneettisen monopolin havainto on julkaistu viitteessä:**

#### **Observation of Dirac Monopoles in a Synthetic Magnetic Field**

M. W. Ray, E. Ruokokoski, S. Kandel, M. Möttönen, and D. S. Hall

Nature, DOI: 10.1038/nature12954, (2014)

### **Linkki videomme monopolin luonnista:**

<https://www.youtube.com/watch?v=HSDolf5FY2s>

### **Menetelmä monopolin luontiin kehitettiin aikaisemmin viitteessä:**

#### **Creation of Dirac Monopoles in Spinor Bose-Einstein Condensates**

V. Pietilä ja M. Möttönen, Phys. Rev. Lett. **103**, 030401 (2009)

<http://link.aps.org/abstract/PRL/v103/e030401>

<http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.103.030401>

## **Vastaavat lehdistötiedotteet eri alueilla (kielillä):**

Yhdysvallat (englanti), Suomi (englanti), Saksa (saksa)

## **Lisätietoja:**



**Mikko Möttönen**, dosentti, tekniikan tohtori  
Aalto-yliopisto  
Teknillisen fysiikan laitos ja O. V. Lounasmaa –laboratorio  
QCD Labs  
mikko.mottonen\*at\*aalto.fi  
p. +358 50 594 0950  
<http://physics.aalto.fi/qcd/>

Mikko Möttönen toimi työn teoreettisen ja laskennallisen osan johtajana. Teoreettiset ideat ja kokeiden tarkka mallinnus ja analyysi olivat erittäin tärkeitä monopolin syntetisoinnin onnistumiselle. Mallinnus toteutettiin [CSC:n](#) supertietokoneilla.



**David S. Hall**, professori  
Amherst College  
Department of Physics  
dshall@amherst.edu  
p. +1 413 542 2072  
<http://www3.amherst.edu/~halllab/>

David Hall toimi työn kokeellisen osan johtajana. Monopoli syntetisoitiin prof. Hallin laboratoriossa Amherst Collegessa Yhdysvalloissa.

## **Rahoitajat**

Tämä materiaali perustuu työhön, jota tukee National Science Foundation projekteilla PHY-0855475 ja PHY-1205822, Suomen Akatemia huippuyksiköllään Laskennallinen nanotiede (projekti nro 251748) ja muilla projekteilla 135794, 272806 ja 141015, ja Laskennallisten tieteiden tohtoriohjelma (FICS). Mitkään tässä materiaalissa esitetyt mielipiteet, löydöt, johtopäätökset ja suositukset eivät välttämättä edusta National Science Foundationin tai muiden rahoitajien näkemyksiä

## Alla annetaan taustatietoa ja määritellään tiedotteeseen liittyviä käsitteitä

### **Magneettinen monopoli**

*"Magneettinen monopoli on yksittäinen magneettinen napa, eli magneettikentän pistemäinen lähde ja magneettinen varaus."*

Elektroni on pistemäinen hiukkanen, jolla on niin sanottu sähköinen alkeisvaraus. Elektroni on siis yksittäinen sähkökentän lähde. Voiko magneettikentällä olla samankaltaista pistemäistä lähdetä?

Jokainen on varmaan joskus pidellyt kädessään kahta magneettia ja huomannut että magneettien tietyt päät vetävät toisiaan puoleensa. Jotkut päät taas hylkivät toisiaan. Tuntuu siis siltä, että magneetin toisessa päässä olisi positiivinen ja toisessa negatiivinen magneettinen varaus. Samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan ja erimerkkiset vetävät toisiaan puoleensa. Magneetin päitä kutsutaan myös navoiksi: pohjoisnapa vastaa positiivista ja etelänapa negatiivista varausta.

Jos sauvamagneetin katkaisee, ei magneettisia napoja magneetin päissä saa erotettua, vaan syntyy kaksi pienempää sauvamagneettia. Tämä johtuu siitä, että sauvamagneetin päissä ei itse asiassa ole magneettisia monopoleja, vaikka sauvasta syntyvä magneettikenttä vastaa tällaista asetelmaa. Sauvan magneettisuus on seurausta atomikoon magneettisten dipolien eli spinien järjestäytymisestä tiettyyn suuntaan.

Onko magneettisia monopoleja olemassa? Yhtäkään aitoa magneettista monopolia ei ole todistettavasti koskaan havaittu. Aluksi tätä pidettiin ongelmana, koska alkuräjähdyksen jälkeistä aikaa kuvaavat teoreettiset mallit ennustivat, että niitä pitäisi olla melko tiheässä. Sittemmin kehitettiin erityinen malli maailmankaikkeuden laajenemiselle selittäen näiden hiukkasten äärimmäisen harvinaisuuden.

Eräiden teorioiden mukaan yhden magneettisen monopolin energiavaraus (massa) on niin suuri, että jos sillä voitaisiin kokonaisuudessaan ladata sähköauton akkua, kulkisi auto sillä latauksella kilometrejä. Tämä selittää sen, miksi magneettisia monopoleja ei todennäköisesti synny hiukkaskiihdyttimissä. Jos magneettisen monopolin massa on todellakin näin suuri, negatiivisesti ja positiivisesti varatun monopolin törmäyksessä vapautuva energia olisi yhtä suuri kuin energia, joka vapautuu, kun kilo dynamiittia räjähtää.

### **Diracin monopoli**

*"Diracin monopoli on mahdollisesti synteettisen magneettikentän pistemäinen lähde, joka muodostuu kvanttimekaanisen virtauspyörteen päätepisteeseen."*

Paul Dirac oli ensimmäinen, joka ymmärsi tutkia teoreettisesti kvanttimekaanisten virtauspyörteiden, eli vorteksien päätöskohtia. Hän huomasi, että jos elektronilla on tällainen päättyvä vorteksi, muodostuu päätöskohtaan väistämättä magneettinen monopoli. Dirac myös huomasi, että jos maailmankaikkeudessa on yksikin magneettinen monopoli, määrää se sähköiselle varaukselle pienimmän mahdollisen arvon, eli varauksen kvantittumisen. Nykyhavaintojen mukaan sähköinen varaus on kvantittunut, mutta se ei vielä todista magneettisen monopolin olemassaoloa.

Diracin monopolin tärkeä erityispiirre on päättyvä vorteksi. Kuitenkin se, että näkyykö vorteksi magneettikentässä vai ei, on määrittelykysymys. Tämän vuoksi Diracin monopolin kenttä kirjoitetaan puhtaasti magneettisen monopolin kenttänä ilman vorteksista tulevaa osaa.

Diracin monopolia käsitellään yleensä melko yksinkertaisessa kvanttimekaanisessa mallissa. Sittemmin magneettisia monopoleja on tutkittu yleisemmissä niin kutsutuissa yhtenäiskenttäteorioissa, joiden mukaan voisi olla olemassa magneettisia monopoleja, jotka eivät liity päättyvään vorteksiin.

## **Synteettinen magneettikenttä**

*”Synteettinen magneettikenttä on keinotekoisesti luotu kenttä, joka saa hiukkasen liikkumaan kuten sillä olisi sähköinen varaus vastaavassa aidossa magneettikentässä.”*

Muillakin hiukkasilla kuin elektroneilla voi esiintyä päättyviä vortekseja, jolloin niiden päihin syntyy samanlainen Diracin monopoli kuin elektronille. Tämä monopoli ei kuitenkaan liity fyysikaaliseen magneettikenttään vaan niin kutsuttuun synteettiseen magneettikenttään. Monopolin rakenne on kuitenkin identtinen Diracin magneettisen monopolin kanssa. Siksi nyt havaittu Diracin monopoli synteettisessä magneettikentässä on tällä hetkellä lähempänä aitoa magneettista monopolia, mitä on koskaan päästy.

## Spin

*”Karkeasti spin määrää mihin suuntaan ja kuinka nopeasti hiukkanen pyörii oman akselinsa ympäri.”*

Spin on lähes kaikilla hiukkasilla esiintyvä magneettinen sisäinen vapausaste. Esimerkiksi elektronilla spin muodostuu kahdesta tilasta: ylös tai alas. Karkeasti tämä tarkoittaa sitä, että pyöriikö elektroni oman akselinsa ympäri myötä- vai vastapäivään.

Kun varattu hiukkanen kuten elektroni pyörii, syntyy magneettikenttä. Tämä ei kuitenkaan ole monopolin kenttä vaan niin kutsuttu dipolienttä, jossa magneettinen pohjois- ja etelänapa ovat niin lähellä toisiaan, ettei niitä voida erottaa. Spin on siis kuten pieni sauvamagneetti, jota ei voi katkaista.

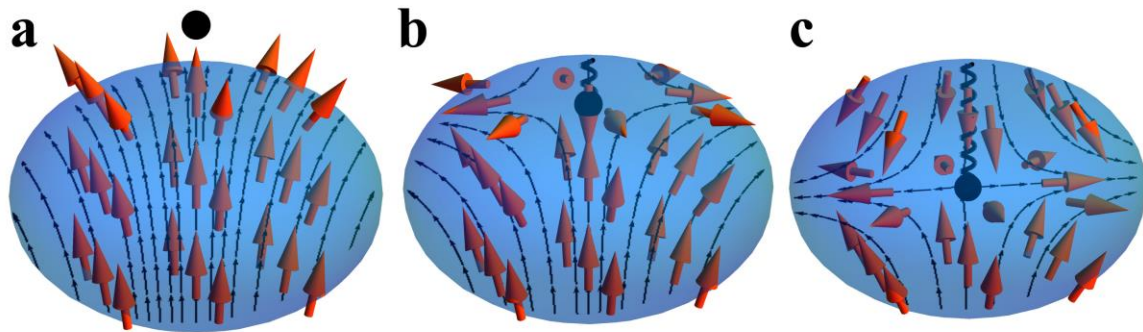
Itseasiassa sauvamagneetit koostuvat lukemattomasta määrästä pieniä spin-dipoleja, jotka lähes kaikki osoittavat samaan suuntaan. Pääallekkäin olevat erimerkkiset navat kumoavat toistensa kentät ja siksi sauvamagneetin kenttä näyttää siltä kuten vain sen päissä olisi erimerkkiset magneettiset navat. Jos sauva katkaistaan, jää katkaisukohtaan päihin vastakkaismerkkiset magneettiset navat, koska spiniä ei voi katkaista.

## Monopolin syntetisointi

*”Monopoli luodaan Bosen–Einsteinin-kondensaattiin ohjaamalla kondenssatin muodostavien atomien magneettista spin-vapausastetta ulkoisella magneettikentällä.”*

Vuonna 2009 Aalto-yliopiston tutkijat Ville Pietilä ja Mikko Möttönen julkaisivat teoreettisen tuloksen, jonka mukaan Diracin monopolin luominen Bosen–Einsteinin-kondensaattiin pitäisi olla mahdollista. Idea on se, että kondensaatin magneettinen spin-vapausaste käännetään ulkoisten magneettikenttien avulla. Valitsemaalle ulkoinen kenttä sopivasti kondensaattiin muodostuu käynnön aikana Diracin monopoli.

Diracin monopoli muodostuu kondensaatin synteettiseen magneettikenttään, ei fysikaaliseen magneettikenttään, jolla ohjataan spin-vapausastetta. Monopolin luontiin ei siis tarvita aitoa magneettista monopolia. Nyt julkaistussa synteettisen magneettisen monopolin luonnissa on käytetty juuri tätä menetelmää.



**Kuvateksti:** Monopolin syntetisointi ajassa alkaen paneelista **a** ja päättyen paneeliin **c**. Nuolet osoittavat laboratoriossa tehdyn fysikaalisen magneettikentän suunnan. Tällä magneettikentällä ohjataan Bosen–Einsteinin kondensaatin sisäinen spin-vapausaste myös nuolten osoittamaan suuntaan. Lopputulos on se, että kondensaatti alkaa liikkua kuten se olisi sähköisesti varattu ja tuntisi magneettisen monopolin olevan kohdassa, joka on merkitty kuvaan mustalla ympyrällä. [Täysresoluutioinen kuva on linkin takana.](#)

## Bosen–Einsteinin-kondensaatti

*”Bosen–Einsteinin-kondensaatti käyttäytyy kuin yksi jättiläisatomi, vaikka siinä voi olla miljoonia atomia.”*

Bosen–Einsteinin-kondensaattia pidetään aineen viidentenä olomuotona kiinteän, netemäisen, kaasumaisen ja plasmamaisen olomuodon ohella. Kondensaatissa yksittäisten atomien merkitys ja paikka hämärtyy ja systeemi käyttäytyy kuten siinä olisi vain yksi suuri atomi. Ensimmäiset Bosen–Einsteinin-kondensaatit saatiin aikaan vuonna 1995, mistä myönnettiin Nobe-palkinto vuonna 2001.

”Bosen–Einsteinin-kondensaatit ovat ikkuna meidän maailmastamme kvantti-ihmemaahan. Mitä useammin sinne katson, sitä enemmän haluan sinne jäädä,” sanoo Möttönen lumoutuneena.

Koska Bosen–Einsteinin-kondensaateissa on useita atomeja, voidaan niistä ottaa valokuvia osin samaanlaisella tekniikalla kuin millä tavallinen digitaalinen kamera toimii. Lisäksi kondensaatteja voidaan painaa haluttuun muottiin ulkoisilla magneettikentillä ja lasersäteillä. Nämä ominaisuudet tekevät kondensaateista aivanlaatuisen työkalun uusien ilmiöiden ja kvanttiteknologioiden kehittämisessä. Kondensaateilla voidaan magneettisen monopolin lisäksi jäljitellä esimerkiksi erilaisten hyödyllisten materiaalien ominaisuuksia atomin tarkkuudella. Yksi kondensaattitutkijoiden unelma on löytää ratkaisu huoneen lämpötilassa toimivien suprajohtavien materiaalien kehittämiseksi.

## **Mikä ihmeen kvanttifysiikka**

*”Kvanttifysiikka selittää luonnonilmiöt parhaiten.”*

Kvanttifysiikka (myös kvanttimekaniikka) on viimeisen noin sadan vuoden aikana kehitetty teoria, jonka on havaittu kuvaavan todellisuutta tarkemmin kuin mikään muu malli. Se on hyödyllinen etenkin atomitason ilmiöiden selittämisessä, mikä on mahdotonta vanhan klassiseksi fysiikaksi kutsutun teorian keinoin. Toisaalta kvanttifysiikka tuottaa suuressa mittakaavassa samat tulokset kuin klassinen fysiikka. Kvanttifysiikkaa voidaan siis pitää klassisen fysiikan laajenuksena.

Kvanttitekniikat hyödyntävät kvanttifysiikan löysempiä lakeja tuottaakseen käytännön sovelluksia. Esimerkiksi kvanttietokone, supernoepa ongelmanratkaisija, on yksi kvanttitekniikoiden tulevaisuuden kulmakivi. Sci-fi-elokuvissa käytetään madonreikiä hyppäämään nopeasti paikasta toiseen ilman, että täytyy kulkea pitkä reitti välietappeineen. Kvanttietokone toimii hieman samalla tavalla, kun se löytää ratkaisun ongelmaan nopeasti käyttämällä menetelmiä, jotka ovat mahdottomia normaalin tietokoneen logiikassa.

”Kvanttifysiikan lait mahdollistavat oikopolkujen ottamisen. Tähän perustuu muun muassa kvanttietokoneen supernoepa toiminta,” selittää Möttönen.

## **Tulevaisuuden tuulet**

Tulevaisuudessa tutkimusryhmät keskittyvät synteettisen magneettisen monopolin rakenteen tarkempaan tutkimukseen. Lisäksi heitä kiinnostaa monopolien dynamiikka ja vuorovaikutukset muiden synteettisten hiukkasten kanssa. Eräs mielenkiintoinen idea on yrittää luoda monopoli, joka ei ole sidottu virtauspyörteen päähän kuten nyt luotu Diracin monopoli. Tällainen rakenne mahdollisesti kuvaa aitoa magneettista monopolia vielä tarkemmin.