

Maailmankaikkeuden magneettikentät

Teemu Willamo

26. lokakuuta 2023

Sisältö

1 Johdanto	2
2 Sähkömagnetismi	3
3 Magneettikentät	9
4 Magnetismin eri muodot	12
4.1 Paramagnetismi	12
4.2 Ferromagnetismi	14
4.3 Diamagnetismi	15
4.4 Muita magnetismin muotoja	16
5 Arkielämän magnetismia	18
6 Magnetismi teknologiassa	19
7 Sähkömagneettinen dynamo	21
8 Maapallon magneettikenttä	23
9 Magneettikenttiä muilla planeetoilla	25
10 Auringon magneettikenttä	26
11 Magneettiset tähdet	29
12 Neutronitähdet ja magnetarit – maailmankaikkeuden voimakaimmat magneettikentät	33
13 Magneettikentät kertymäkiekoissa	35
14 Galaktiset jättiläismagneettikentät	36
15 Kosmologiset magneettikentät?	38
16 Epilogi?	39

Luku 1

Johdanto

”Oletko huomionnut magneettikentät?”

Tämä kysymys on saanut monet tähtitieteilijät repimään hiuksiaan esitelmänsä päätteeksi, kun se on heille esitetty. Ainakin joidenkin tähtitieteilijöiden keskuudessa magneettikenttien huomioimisesta on tullut eräänlainen vakiovitsi, pieni huomautus, jolla voidaan murskata hyvätkin tutkimukset, jos ne eivät ole ottaneet tuota pientä, mutta usein äärimmäisen merkityksestä seikkaa huomioon. Magneettikentät ovat arkielämämme kannalta outo ja usein vaikeasti ymmärrettävä, etäiseltä tuntuva ilmiö, jota ei ihmisen aisteilla pysty suoraan havaitsemaan, ja niiden hahmottaminen tuottaa usein vaikeuksia ammatitutkijoillekin. Olen itse tehnyt väitöskirjan Auringon kaltaisten tähtien magneettisesta aktiivisuudesta, mutta tämän jälkeen ymmärsin, miten puutteellista ymmärrykseäni magnetismin perusteista siitä huolimatta oli. Tämä oli omiaan motivoimaan minua perehtymään aiheeseen lisää, ja kirjoittamaan ylös oppimaani tämän teoksen muotoon.

Tämän kirjan pyrkimys onkin kertoa magneettikentistä niin, että kuka tahansa pystyy saamaan jonkinlaisen käsityksen siitä, mitä ne ovat. Olen siis itse taustaltani tähtitieteilijä, mikä luonnollisesti näkyy kirjan aihepiireissä. Mutta vaikka tässä keskitytään suurilta osin maapallon ulkopuoliseen magnetismiin, on pyrkimykseni silti esitellä magneettikenttiä myös muista näkökulmista.

Ensimmäiset luvut käsittelevät magnetismin teoriaa yleisellä tasolla, minkä jälkeen käytetään pari lukua magnetismiin mitä voimme havaita tai käyttää maan päällä. Lopuksi käsitellään magnetismia useissa erilaisissa tähtitieteellisissä kohteissa.

Jos lukijaa kiinnostaa paneutua sähkömagnetismin teoriaan syvemmälle, voin suositella tärkeintä omaa lähdeostani: The Feynman Lectures on Physics -sarjan toista osaa, joka käsittelee sähkömagnetismia. Tähtitieteellisten kohteiden magnetismista ei sen sijaan tietääkseni ole mitään kovin kattavaa yhtenäistä teosta; planeettojen, tähtien, galaksien, ja muiden kohteiden magneettikentistä löytyy toki omia yhteenvetojaan, mutta mitään henkilökohtaista suosikkia en osaa niiden joukosta nimetä.

Luku 2

Sähkömagnetismi

Jotta magnetismia voisi oikeasti ymmärtää, on myös ymmärrettävä sähköä. Nämä kaksi ilmiötä eivät olekaan toisistaan erillisiä, vaan nivoutuvat erottamattomasti yhteen sähkömagnetismiksi. Sähkömagnetismi on yksi luonnon neljästä tunnetusta perusvuorovaikutuksesta, kolmen muun ollessa gravitaatio eli painovoima, sekä vahva ja heikko vuorovaikutus, joita myös ydinvoimiksi kutsutaan. Sähkömagnetismi on gravitaation ohella näistä ainoa, jonka vaikutuksen voi havaita omassa arkielämässä. Itse asiassa sähkömagnetismi aiheuttaa lukemattoman määrän ilmiöitä, joita ei ehkä heti tule yhdistäneeksi sähköön tai magnetismiin. Esimerkki: kun Maan painovoima vetää sinua jatkuvasti puolelensa, on sähkömagnetismin ansiota, että et putoa lattian läpi suoraan Maan keskipisteeseen. Lattian molekyylien väliset sähköiset voimat nimittäin estävät jalkojesi molekyylejä putoamasta lävitseen. Ylipäänsä mikään aine ei pysyisi kasassa ilman hiukkasten välisiä sähkömagneettisia voimia, vaan ilman niitä kaikki aine luhistuisi gravitaation takia kasaan neutronitähtien tapaan, joissa vahva vuorovaikutus pystyy vielä estämään luhistumisen äärettömän pieneksi pisteeksi, mustaksi aukoksi. Myös kaikki valo mitä silmämme näkevät, on sähkömagneettista aaltoliikettä, missä sähkökentät ja magneettikentät etenevät aaltoillen samaan suuntaan, ja niiden aallonpituus ratkaisee, pystyvätkö silmämme rekisteröimään nuo aallot.

Kun puhutaan magnetismista, tulee väistämättä vastaan termi magneettikenttä. Samoin sähköntapauksessa oleellisessa osassa on vastaava sähkökenttä. Fyysikot puhuvat mielellään kentistä, joiden avulla on kätevää kuvata sähkömagnetismin kaltaisia ilmiöitä. Millainen otus siis on kenttä? Kentällä, kuvasi se sitten sähköä, magnetismia, tai mitä tahansa muuta, on aina joka paikassa jonkinlainen voimakkuus. Voit esimerkiksi mitata magneettikentän voimakkuuden oman nenänpääsi kohdalla, sitten astua askeleen sivuun, ja tehdä taas saman mittauksen uudessa paikassa. Ja kun tämän kentän voimakkuus tiedetään riittävän laajalla alueella, voidaan sen muotojen hahmottamiseksi piirtää erilaisia kenttäviivoja, joilla havainnollistetaan sitä, miten kenttä kulkee esimerkiksi ympäri huonetta, missä äsken teit mittauksia, kuten nähdään kuvassa 3.1. Jos kuljet eteenpäin tiettyä kenttäviivaa pitkin, se tarkoittaa, että kentän voimakkuus pysyy kulkureitilläsi

koko ajan samana. Kenttäviiva ei siis ole varsinaisesti mikään todellinen asia, kenttä ei oikeasti muodosta mitään viivoja, mutta ne helpottavat huomattavasti asian hahmottamista.

Millä tavalla sähkö- ja magneettikentät sitten tarkemmin ottaen liittyvät toisiinsa? Jos ymmärrät differentiaali- ja integraalilaskentaa, on tähän olemassa hyvin yksiselitteinen vastaus: Maxwellin yhtälöt. Jos taas nämä sanahirviöt saavat sinut voimaan pahoin ja harkitsemaan lukemisen lopettamista tähän, älä huoli – en yritä opettaa, miten näiden yhtälöiden matematiikka oikeasti toimii, vain antamaan jonkinlaisen yleiskäsityksen siitä, mitä ne meille kertovat, miten on mahdollista, että neljä lyhyttä kaavaa kertovat meille kaiken siitä, miten sähkömagnetismi nykykäsityksemme valossa toimii. Niille, jotka haluavat todella oppia käyttämään näitä yhtälöitä, suosittelen yliopistofysiikan sähkömagnetismin peruskursseja.

Joka tapauksessa, tältä näyttävät Maxwellin neljä yhtälöä¹, joista muistan että jollain fysiikan kurssilla meille sanottiin, että jokaisen fyysikon tulisi osata ne vaikka unentokkurassa keskellä yötä herättyään (tuskin olisi onnistunut itseltäni kuitenkin):

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.4)$$

Menemättä kovin täsmällisesti yhtälöiden matemaattisiin hienouksiin, mitä ne siis meille kertovat? Ensinnäkin, yhtälöissä pyörivät kirjaimet E ja B : näistä E tarkoittaa sähkökenttää ja B magneettikenttää. Kaikissa neljässä yhtälössä esiintyvä kärjellään seisova kolmio on nimeltään nablo²; kaksi ensimmäistä yhtälöä on muotoa nablän ja sähkö- tai magneettikentän pistetulo: tätä nimitetään sähkö- tai magneettikentän divergenssiksi, kun taas alemmat yhtälöt ovat nablän ja kenttien ristitulot, joita nimitetään roottoriksi. Pistetulo kuvaa sähkö- ja magneettikentän lähteisyyttä, ristitulo taas pyörteisyyttä. (ks. kuvat!)

Ensimmäinen yhtälö voidaan ymmärtää niin, että meillä on sähkövaraus ρ , joka toimii sähkökentän lähteenä. Sähkövaraus voi olla esimerkiksi sähköisesti varattu hiukkanen, kuten elektroni tai protoni, tai sitten joku paljon suurempi varattu kappale (joka toki koostuu yleensä elektroneista ja protoneista). Sähkökenttää kuvataan viivoilla, jotka päätyvät tuohon sähkövaraukseen, joka sähkökentän synnyttää. Eli tiivistettynä: sähkökentän lähteenä toimivat sähkövaraukset.

¹Yhtälöt ovat tässä niin sanotussa differentiaalimuodossaan. Näin ne saa esitettyä mahdollisimman tiiviisti. Usein käyttökelpoisempi muoto varsinaisten laskujen tekemiseen on yhtälöiden integraalimuoto.

²Nabla on eräänlainen matemaattinen operaattori – ei siitä sen enempää.

Toisesta yhtälöstä taas näemme, että magneettikentän divergenssi on nolla. Tämä tarkoittaa, että magneettikenttä on lähteetön. Ei ole olemassa magneettisia varauksia, jotka synnyttäisivät magneettikenttää³. Magneettikenttää kuvaavat kenttäviivat eivät myöskään ala mistään tai pääty minnekään. Magneettiset kenttäviivat muodostavat suljettuja lenkuroita, joita pitkin kuljettaessa päädytään takaisin lähtöpisteeseen, tai vaihtoehtoisesti ne häviävät jonnekin ympäröivään universumiin, kiertäen siellä ikuisesti ympäriinsä ties missä (ja periaatteessa lopulta palaavat takaisin lähtöpisteeseen, vaikka siinä välissä pitäisi kiertää halki koko universumin).

Kaksi jäljellä olevaa yhtälöä kertovat, miten sähkö- ja magneettikentät liittyvät toisiinsa. Roottori kertoo meille miten ”pyörteinen” kenttä on. Jos se on nolla, kulkevat sähkövarauksesta lähtevät kenttäviivat suoraan. Jos se ei ole nolla, vääntyvät viivat, eli kentässä on pyörteisyyttä. (Kuva!) Näemme, että tämä ei ole aina nolla, vaan sähkökentän ristitulo on yhtä kuin $-\frac{\partial B}{\partial t}$, eli magneettikentän negatiivinen aikaderivaatta. ($\frac{\partial B}{\partial t}$ tarkoittaa magneettikentän B muutosta ajassa t .) Tämä tarkoittaa sitä, että jos magneettikenttä muuttuu ajan myötä, synnyttää se myös sähkökentän, jolla on tietty pyörteisyys. Jos taas meillä on vakaa magneettikenttä, joka ei muutu miksiäkään, ei se myöskään muodosta sähkökenttää. (Miinusmerkki vaikuttaa vain siihen, minkä suuntainen kenttä on, ja se taas on yhteisesti päätetty, että tietyn suuntainen kenttä on merkiltään positiivinen, ja vastakkaisen suuntainen taas negatiivinen, joten siitä ei tarvitse sen kummemmin välittää.) Taas tiivistäen: ajassa muuttuva magneettikenttä synnyttää aina sähkökentän. Pyörteisyydestä meidän ei tämän kirjan puitteissa tarvitse välittää tämän enempää, oleellisinta meille on tieto siitä, miten sähkökenttää voidaan synnyttää magneettikentän avulla.

Vastaavasti viimeisestä yhtälöstä näemme, millainen pyörteisyys magneettikentällä on. Koska magneettisia varauksia ei tiettävästi ole olemassa, eivät ne voi synnyttää magneettikenttää; näin ollen näemme tästä yhtälöstä myös sen, miten magneettikenttä voi syntyä. Samoin kuin edellisessä yhtälössä esiintyi magneettikentän aikaderivaatta, on tässä nyt mukana sähkökentän aikaderivaatta, jolla on jotain kertoimia edessään. Näistä kertoimista ei tarvitse sen kummemmin välittää, ellei sitten halua oikeasti laskea yhtälöllä jotain. Yhtälö kuitenkin kertoo sen, että ajassa muuttuva sähkökenttä muodostaa magneettikentän, eli sama kuin edellisessä yhtälössä, toisin päin. Näin ollen sähkö- ja magneettikentät synnyttävät toisiaan, jos ne eivät ole täysin staattisia, eli ajassa muuttumattomia. Toinen tapa muodostaa magneettikenttä on sähkövirta, eli sähkövarausten liike, J . Esimerkiksi sähköjohdoissa kulkevan sähkövirran ympärille muodostuu siis aina magneettikenttä. Eli taas tiivistettynä: muuttuva sähkökenttä tai liikkuvat

³Jotkut tutkijat uskovat, että on olemassa myös magneettisiksi monopoleiksi nimitettyjä ”magneettisia varauksia”, jotka synnyttäisivät magneettikenttiä samoin kuin sähkövaraukset sähkökenttiä. Todisteita tällaisista ei ole kuitenkaan löytynyt, mutta jos sellaisia jostain löytyisi, tarkoittaisi se, että toinen yhtälö ei olisikaan aina yhtä kuin nolla. Sen isompia ongelmia tällaisten magneettisten monopolien löytymisen tuskin aiheuttaisi, koska yhtälön nolla voitaisi helposti korvata jollakin samanlaisella termillä kuin ensimmäisen yhtälön sähkövaraus, eikä se vaikuttaisi muihin yhtälöihin. Jos tämä ajatus osoittautuisi oikeaksi, olisi kuitenkin selvää, että nämä magneettiset monopolit olisivat hyvin harvinaisia, sillä niistä ei ole nähty vielä mitään jälkiä.

sähkövaraukset synnyttävät aina magneettikentän.

Näiden Maxwellin neljän yhtälön lisäksi kirjoitetaan ylös vielä yksi yhtälö – vain yksi, tämä on viimeinen, kunniasanalla. Kyseessä on Lorentzin voiman yhtälö, joka kertoo, minkälaisen voiman F sähkökenttä ja magneettikenttä aiheuttavat johonkin hiukkaseen. Yhtälö näyttää tältä:

$$F = q(E + v \times B) \quad (2.5)$$

Yhtälössä q on hiukkasen sähkövaraus, v hiukkasen nopeus, ja E ja B ovat totutusti sähkö- ja magneettikenttä hiukkasen kohdalla. Yhtälöstä näemme, että sähkökenttä aiheuttaa voiman, joka työntää hiukkasta sähkökentän suuntaisesti – joko suoraan eteen- tai taaksepäin. Tämä voima on sitä voimakkaampi, mitä suurempi hiukkasen sähkövaraus on. Magneettikenttä sen sijaan vaikuttaa hiukkaseen vain, jos se on liikkeessä – jos hiukkasen nopeus v on nolla, magneettikentällä ei ole vaikutusta. Magneettikentän kohdalla on taas myös ristitulo – tämä tarkoittaa, että magneettikenttä ei työnnä hiukkasta kentän suuntaisesti, vaan poikittain kenttää vastaan. Tällä ilmiöllä on erikoisia seurauksia: magneettikenttä saattaa esimerkiksi ohjata hiukkasia spiraalin muotoisille radoille, toisin kuin yksinkertaisemmin vaikuttava sähkökenttä.

Yhtälöstä näemme toki myös, että jos hiukkasella ei ole sähkövarausta, eli jos $q = 0$, niin mitään ei tapahdu. Sähkövaraus onkin edellytys sille, että sähkömagnetismi vaikuttaa kohteeseensa ylipäättään mitenkään. Esimerkiksi neutroni on hiukkanen jolla ei ole sähkövarausta – näin ollen se ei välitä sen kummemmin sähkö- kuin magneettikentistäkään.

Oleellista on vielä se, että sähkövaraus voi olla joko positiivinen tai negatiivinen, eli plus- tai miinusmerkkinen. Esimerkiksi protoni on positiivisesti varautunut, elektroni taas negatiivisesti. Plus ja miinus vetävät toisiaan puoleensa, kun taas kaksi plussaa tai kaksi miinusta hylkivät toisiaan. Tunnet tämän esimerkiksi viedessäsi paristojen plus- tai miinusnapoja lähelle toisiaan. Yllä olevassa yhtälössä tämä tulee ilmi kenttien ja voimien suunnan kautta. Esimerkiksi protoni – positiivinen sähkövaraus – synnyttää positiivisen sähkökentän, jota havainnollistetaan poispäin plusmerkkisestä hiukkasesta osoittavana nuolena. Toinen protoni lähistöllä – jolla on positiivinen sähkövaraus q – kokee tästä kentän suuntaisen, eli siis hylkivän voiman, joka työntää sitä poispäin kentän synnyttävästä protonista. Elektroni taas – jolla on saman suuruinen negatiivinen sähkövaraus $-q$ – kokee tämän takia negatiivisen voiman, joka on vastakkainen kentän suuntaan nähden, eli protoni vetää sitä puoleensa. Se, mikä varaus, suunta ja voima on positiivinen ja mikä negatiivinen, on tietenkin vain sopimuskysymys, luonto ei itsessään erottele näitä toisistaan.

Maxwellin neljä yhtälöä, sekä yhtälö Lorentzin voimalle, ja tietämys siitä, minkälaisia sähkövarauksia luonnossa esiintyy: siinä se on – teoriassa. Koko nykytieteen ymmärrys sähkömagnetismista voidaan periaatteessa palauttaa tähän. Luonnosta tunnetaan kourallinen alkeishiukkasia, joilla on omat sähkövarauksensa. Käytännössä tuntemamme aine koostuu lähinnä kolmesta sähköisesti varatusta hiukkasesta – elektroneista, sekä ylös- ja alas-kvarkeista, jotka muodostavat protonit ja neutronit – näistä neutronilla ei ole sähkövarausta, sillä sen sisältämien

kvarkkien varaukset kumoavat toisensa. Aineen rakenne sen sijaan on niin monimutkainen kokonaisuus, että Maxwellin yhtälöiden käyttö sellaisenaan käy nopeasti hyvin hankalaksi, jos haluttaisi ottaa huomioon joka ikinen elektroni ja protoni, kun varaukset tulevat ja menevät ja niistä muodostuu mitä ihmeellisimpiä rakennelmia. Mutta aineen rakenteeseen ja kemiaan ei tässä pureuduta sen tarkemmin. Eikä enempää yhtälöitä ole tulossa, nyt voit huokaista helpotuksesta.

Palataan vielä vähän siihen, mitä opimme aiemmista yhtälöistä. Sillä, että sähkö- ja magneettikenttä muodostavat toisiaan, on nimittäin hyvin mielenkiintoisia seurauksia. Oikealla tavalla etenevä sähkökentän aalto nimittäin muodostaa magneettikentän, joka taas muodostaa sähkökentän, jotka näin ylläpitävät toinen toistaan, kulkiessaan eteenpäin halki avaruuden. Yhtälöissä esiintyvistä vakioista (tyhjiön sähköinen permittiivisyys ϵ_0 ja magneettinen permeabiliteetti μ_0 , mikäli joku lukija haluaa tutustua näihin tarkemmin) voidaan myös laskea nopeus, jolla tällainen aaltoliike etenee. Tästä saadaan, kappas vain, valonnopeus. Valo koostuu siis sähköisistä ja magneettisista aalloista, jotka etenevät rinta rinnan, kiitäen luonnonlakien määräämällä valonnopeudellaan halki avaruuden. Sähkömagnetismi tarjoaa siis linkin ei pelkästään sähköön ja magnetismin välille, vaan liittää mukaan myös kolmannen äkkiseltään ajateltuna täysin irrallisen ilmiön, eli valon. Valo voidaan nähdä myös hiukkasina, fotoneina, mutta tuo hiukkanen kuljettaa aina mukanaan sähkömagneettista aaltoliikettä. Itse asiassa fotonin *on* sähkömagneettista aaltoliikettä. Kvanttimekaniikan aalto-hiukkas-dualismiin en tässä mene sen syvemmälle, mutta todettakoon vain lyhyesti, että se on hyvin hämähäperäistä ja jännää!

Sähkömagneettiset aallot, tai fotonit, ovat joka tapauksessa tavallaan vastuussa kaikesta sähköstä tai magnetismista, sillä sähkömagnetismin välittäjähiukkasena kaikki sähkömagneettiset voimat välittyvät niiden kautta. Eli ilman fotoneita me emme tuntisi tästä voimasta mitään. Se, nähdäänkö nämä hiukkasina vai pelkästään sähkö- ja magneettikenttien jatkuvana aaltoiluna, ei sinänsä ole oleellista, mutta haluan kuitenkin huomauttaa fotonienkin roolista tässä yhteydessä, sillä se miten asiat, jotka saattavat ensiksi vaikuttaa täysin erillisiltä, liittyvät kuitenkin toisiinsa, on joskus todella ihmeellinen asia.

Tämä yhteys huomioiden, ei olekaan välttämättä niin yllättävää, että sähkömagnetismi liittyy vahvasti myös suhteellisuusteoriaan. Einstein rakensi suppean suhteellisuusteorian suurilta osin Maxwellin muotoilemien sähkömagnetismin lakien päälle. Suhteellisuusteorian kautta voi myös hahmottaa sähköön ja magnetismin suhdetta toisiinsa. Sillä magnetismi on, tavallaan, vain suhteellisuusteorian sähköiseen voimaan tuoma lisäys. Samoin kuin valonnopeutta lähellä liikuttaessa alkaa tapahtua muitakin outouksia – esimerkiksi aika hidastuu ja etäisyydet kutistuvat – ilmestyy sähköönkin rinnalle outo lisävoima, magnetismi. Kun liikumme arkielämässämme tyypillisillä nopeuksilla, jotka ovat kaukana valonnopeudesta, ovat sähköiset voimat periaatteessa valtavan paljon magneettisia voimia suurempia. Vasta lähellä valonnopeutta magneettiset voimat ovat merkittäviä sähköisten rinnalla – periaatteessa. Sähköisiin voimiin liittyy kuitenkin vielä sellainen tärkeä huomio, että tuntemamme aine sisältää yleensä hyvin täsmällisesti saman määrän protoneita ja elektroneja. Tällöin

nämä sähkövaraukset kumoavat toisensa lähestulkoon täydellisesti. Me elämme täydellisessä tasapainossa, missä emme tajua miten valtavan suuria voimia kaikki aine, mistä mekin koostumme, pitää sisällään. Tehdään yksinkertainen lasku: käytetään tähän Coulombin voiman yhtälöä⁴, jonka avulla voimme laskea, miten suuri sähköinen hylkivä voima kahden ihmisen välillä olisi, jos molemmat koostuisivat pelkästään protoneista⁵. Oletetaan, että molemmat painavat 50 kg (tämä massa koostuisi siis nyt pelkästään protoneista), ja seisovat metrin päässä toisistaan. Vastaukseksi saadaan, että voima olisi noin $8 \cdot 10^{66}$ newtonia. Tämä on *valtavan* paljon! Jos tällainen voima kohdistettaisiin maailmankaikkeuden massiivisimpaan tunnettuun yksittäiseen kappaleeseen, supermassiiviseen mustaan aukkoon Holmberg 15A-galaksin keskustassa, joka painaa arvioiden mukaan 40 miljardia kertaa Aurinkoa enemmän, kiihdyttäisi se tämän jättiläis-mustan aukon attosekunneissa⁶ lähelle valonnopeutta. Ja tämä siis jos meillä olisi vain kahden laiha ihmisen verran protoneita! Näin valtava olisi sähköinen voima, jos se ilmenisi todella kaikella potentiaalillaan.

Pointtini siis oli, että sähköiset voimat tasapainoittavat itsensä elektronien ja protonien tasaisella jakaumalla lähes täydelliseen tasapainoon. Joten vaikka magnetismi on *paljon* sähköä heikompi voima (kun ollaan kaukana valonnopeudesta⁷), voi se silti olla hyvinkin merkittävä, koska sähköiset voimat kumoutuvat lähestulkoon kokonaan; pienen pienistä poikkeamista tuohon täysin tasaiseen elektronien ja protonien jakaumaan, jää jäljelle vain pieniä sähköisiä voimia, jotka pystymme vielä käsittämään, magneettisten voimien rinnalla.

Kerrotaan vielä vähän siitä, miten näitä kenttiä mitataan. Sähkömagnetismin mittayksiköt ovat arkielämässä vähemmän tuttuja kuin esimerkiksi metrit ja kilogrammat, joten ne lieenee syytä esitellä erikseen, jotta lukija pysyy kartalla. Magneettikenttiä, tai tarkemmin ottaen magneettista vuontiheyttä, mitataan tesloissa – vaihtovirran kehittäneen fyysikko Nikola Teslan nimi on jäänyt elämään muuallekin kuin sähköautoihin. Erityisesti tähtitieteilijät käyttävät kuitenkin myös yksikköä gauss. 1 tesla on 10 000 gaussia. Mutta koska tesla on kansainvälisen standardin, SI-järjestelmän mukainen yksikkö, pysytään tässä kirjassa tesloissa. Fyysikot tarvitsevat teslojen lisäksi toisinaan myös weberejä, joka on magneettisen vuon (eikä vuontiheyden) yksikkö. Sitten sähköön liittyvät omat yksikkönsä, voltit, ampeerit, faradayt ja niin edelleen, mutta tämä kirja keskittyy magnetismiin, joten tässä puhutaan lähinnä tesloista.

⁴Lupasin, ettei tässä tule enempää yhtälöitä, joten en kirjoita tätä auki; kyseessä on kuitenkin tavallaan ensimmäisen Maxwellin yhtälön (joka kulkee myös nimellä Gaussin laki) erikoistapaus, joka kertoo millainen voima kahden sähkövarauksen välillä on.

⁵Ehkä tällöin ei voida puhua ihmisistä; kyse olisi ennemminkin kahdesta protoniläjästä, joilla olisi saman verran massaa kuin ihmisillä.

⁶Yksi attosekunti on 10^{-18} eli 0.000000000000000001 sekuntia.

⁷Ja jos pysymme täysin paikallaan, ei magnetismi vaikuta ollenkaan, kuten Lorentzin voimasta käy ilmi.

Luku 3

Magneettikentät

Edellisessä luvussa opimme, että magneettisia varauksia ei tiettävästi ole olemassa, vaan magneettikenttä vaatii syntyäkseen aina joko muuttuvan sähkökentän tai sähkövirran eli liikkuvia hiukkasia, joilla on sähkövaraus. Monille meistä magnetismin tutuin muoto lienevät kuitenkin jääkaappimagneetit, jotka pysyvät kiinni jääkaapin ovessa ilman mitään näkyvää sähkövirtaa tai sen kummempia sähkökenttien heilahteluja. Mistä nuo pikkuruiset jääkaappireissujamme pirstävät turistirihkamat sitten saavat magneettikenttensä? Vastaus piilee aineen rakennuspalikoissa, erityisesti atomien sisältä löytyvissä elektroneissa.

Elektronien ajatellaan yksinkertaistetusti kiertävän atomiydintä ikään kuin planeetat Aurinkoa. Tarkalleen ottaen asiaan liittyy paljon monimutkaisempaa kvanttifysiikkaa, mutta asian voi hahmottaa ajattelemalla elektronin olevan jatkuvassa liikkeessä atomin sisällä. Elektronillahan on negatiivinen sähkövaraus, jolloin sen liike vastaa sähkövirtaa, josta taas – kuten tiedämme – syntyy magneettikenttä. Elektroneilla on myös ominaisuus nimeltä spin. Tätä kuvataan usein ikään kuin hiukkasen pyörimiseksi, vaikka todellisuudessa spin on jotain aivan muuta, eikä sille löydy arkielämästä tuttua vastinetta. Kvanttimekaniikassa tilanne on usein tämä: siihen liittyvät ilmiöt eivät mitenkään näy suuremmissa mittakaavoissa, eikä niitä siten pysty ymmärtämään millään meille tutuilla käsitteillä. On vain hyväksyttävä, että elektroneilla ja muilla hiukkasilla on tuo kyseinen, muun muassa magnetismia aiheuttava ominaisuus, jota me nimitämme spiniksi. Eli kaikkialla, missä on atomeja, voi ajatella olevan myös sähkövirtoja – ja siten myös magneettikenttiä! Valtaosassa atomeja elektronit spineineen ovat kuitenkin järjestäytyneet siten, että niiden pikkuruiset magneettikentät kumoavat toisensa. Jos yksi elektroni aiheuttaa yhdensuuntaisen magneettikentän, ja toinen vastakkaisensuuntaisen, kumoutuu niiden vaikutus, eikä jäljelle jää magneettikenttää lainkaan. Yksi kvanttimekaniikan tärkeimmistä laeista – nimeltään Paulin kieltoääntö – jopa vaatii, että kaksi elektronia tai muuta hiukkasta¹ voivat olla samassa tilassa vain, jos niiden spinit ovat eri suuntaiset

¹Tarkalleen ottaen Paulin kieltoääntö pätee vain fermioneihin, eli hiukkasiin, joiden spin on puoliluku; bosonit, joiden spin on kokonaisluku (esimerkiksi fotonit), eivät sen sijaan välitä tästä säännöstä.

– ja näin kumoavat toistensa aiheuttamat magneettikentät. Aina näin ei kuitenkaan tapahdu. Joissain alkuaineissa – tunnetuimpina rauta, joka on voimakaimmin ferromagneettinen alkuaine², sekä nikkeli ja koboltti – atomien elektronit ovat kuitenkin järjestäytyneet siten, että niiden synnyttämät magneettikentät eivät täysin kumoudu. Jos nämä atomit ja niistä koostuvat suuremmat kiteet ovat järjestäytyneet sopivasti, saattavat niiden magneettikentät vahvistaa toisiaan, jolloin magneettikenttä voidaan havaita suuremmassakin mittakaavassa. Ferromagnetismi on magnetismin tunnetuin muoto, mutta useammat aineet ovat paramagneettisia, joka on heikompi muoto magnetismista. Näitä eri tyyppisiä magnetismin muotoja käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

Elektronit eivät ole ainoita jonkinlaisessa liikkeessä olevia varattuja hiukkasia, sillä eivät atomiydinten protonitkaan tarkalleen ottaen kökötä kiltisti paikallaan, ja niilläkin on oma spininsä. Hiukkasten magneettinen vaikutus kuitenkin heikkenee suhteessa niiden massaan, ja koska protonin massa on paljon isompi, on protonien vaikutus magnetismiin vastaavasti paljon heikompi. Siksi tässä puhutaan lähinnä vain elektroneista. Myös elektronien liike atomiydinten ympärillä vaikuttaa aineen magnetismiin, mutta sekin huomattavan paljon vähemmän kuin elektronien spin.

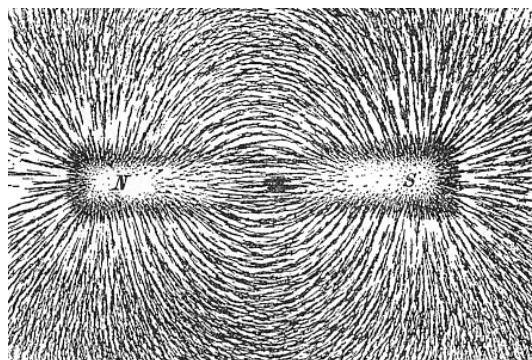
Kaikkien maailman magneettikenttien alkuperä on siis jonkinlaisissa sähkövirroissa, joko liikkuvissa varatuissa hiukkasissa, tai sitten atomin sisällä tapahtuvassa mystisessä kvanttimekaniikassa, mistä elektronien spinit ovat selvästi tärkein osatekijä.

Katsotaanpa sitten miltä jonkun yksittäisen kappaleen magneettikenttä tyypillisesti näyttää. Yksinkertaisessa tilanteessa tyypillinen magneettikenttä on muodoltaan niin sanottu dipoli (kuva 3.1). Dipolin muotoisella kentällä on kaksi napaa³ (joita magnetismin tapauksessa kutsutaan etelä- ja pohjoisnavaksi), joita ympäröivät kenttäviivat ovat rakenteeltaan selkeän pyöreitä. Kun mennään kauemmas navoista, kenttäviivat etääntyvät toisistaan, mikä tarkoittaa että magneettikentän voimakkuus heikkenee. Esimerkiksi yksinkertaisen sauvamagneetti synnyttää magneettikentän, jonka muoto on suurinpiirtein dipoli, samoin käämi, jonka läpi kulkee sähkövirta, tai maapallo. Magneettiset aineet (paitsi diamagneettiset, kuten seuraavassa luvussa käy ilmi), esimerkiksi rauta, tuntevat aina voiman, joka vetää niitä kohti voimakkaampaa magneettikenttää. Näin olen kumpi tahansa magneetin napa vetää rautakappaleita puoleensa. Sen sijaan kahden magneetin etelänavat tai pohjoisnavat hylkivät toisiaan, kun taas toisen etelänapa ja toisen pohjoisnapa vetävät toisiaan puoleensa.

Jos ollaan aivan tarkkoja, niin maailmaa ei edes voi jakaa yksittäisiksi ”kappaleiksi” ja niiden ”omiksi” magneettikentiksi. Maailmankaikkeudessa on yksi kaiken kattava magneettikenttä, jolla on jokin arvo, minne sitä meneekään mittaamaan. Tämä ”universaali” magneettikenttä on vain hyvin heikko, jos ollaan kaukana mistään kappaleesta, jolla on ”oma” magneettikenttensä. Tämä maailmankaikkeuden yksi ja ainoa ”todellinen” magneettikenttä tietysti muodostuu kaikista maailmankaikkeuden sähköirroista ja spineistä, jotka vaikutta-

²”Ferro” etuliite jo itsessään viittaa rautaan.

³*Di* – kaksi, sekä *poli* – napa.



Kuva 3.1: Esimerkki dipolin muotoisesta magneettikentästä yksinkertaisen sauvamagneetin ympärillä. Kuvassa rautapöly on järjestäytynyt magneettikentän mukaisesti, jolloin kentän muoto käy helposti ilmi. N ja S kuvaavat magneettista pohjois- ja etelänapaa. (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnet0873.png>)

vat siihen omilla magneettikentillään. Esimerkiksi maapallon magneettikenttä ei ole täysin erillinen Auringon magneettikentästä, vaan kauemmas maapallolta mentäessä nämä sulautuvat yhteen, kunnes riittävän kaukana maapallon vaikutus näiden yhteenlaskettuun magneettikenttään häviää, ja jäljellä on käytännössä vain Auringon magneettikenttä. Samoin Auringon magneettikenttä sulautuu lopulta Aurinkokunnan ulko-osissa yhteen Linnunradan magneettikenttään, ja niin edelleen. Mutta jos ollaan lähellä maapalloa, on Maan magneettikenttä ylivoimaisesti voimakkain kenttä, ja samoin lähellä jotain voimakasta maanpäällistä magneettia tämän magneetin aiheuttama kenttä on selvästi voimakkaampi kuin maapallon tai Auringon, ja näin ollen voidaan sanoa, että tämä olisi näistä erillinen, täysin irrallinen ”oma” magneettikenttensä, vaikka tarkalleen ottaen näin ei toki asia olekaan. Jotain yksinkertaistuksia on voitava tehdä, jotta asioita voisi ollenkaan yrittää ymmärtää.

Luku 4

Magnetismin eri muodot

Magnetismia käsittelevissä oppikirjoissa esitetään yleensä magnetismin kolme eri muotoa: dia-, para- ja ferromagnetismi. Jotta tämä kirja ei tuntuisi puutteelliselta, käytettäköön yksi luku noiden kolmen aineen rakenteesta aiheutuvan magnetismin muodon kuvailuun.

Näistä jo edellisessä luvussa mainittu ferromagnetismi on selvästi näkyvin, sillä se on ylivoimaisesti voimakkain. Ferromagneettisista aineista, kuten raudasta, koostuvilla kappaleilla voi olla omia, pysyviä magneettikenttiään. Seuraavaksi voimakkain magnetismin muoto, paramagnetismi, ei ole yhtä tunnettua kuin ferromagnetismi, eikä se pysty muodostamaan pysyviä magneettikenttiä.

4.1 Paramagnetismi

Samoin kuin ferromagneettiset aineet, myös paramagneettisen aineen atomit muodostavat omia pikkuisia magneettikenttiään, jotka johtuvat pääosin niiden elektronien spineistä. Paramagneettinen aine reagoi ulkoiseen magneettikenttään siten, että magneettikentän voimistuessa yhä suurempi osa näistä pikkuruisista magneeteista kääntyy samansuuntaisiksi, voimistaen näin ulkopuolelta tulevaa magneettikenttää. Mitä voimakkaampi magneettikenttä, sitä suurempi osa atomeista on kääntynyt samansuuntaisiksi, ja sitä voimakkaammaksi tulee myös paramagneettisen kappaleen oma magneettikenttä – puhutaan kappaleen magnetoitumisesta. Magneetilla voi siis vetää paramagneettisia aineita puoleensa. Toisin kuin ferromagneettiset kappaleet, jotka voivat muodostaa omia, pysyviä magneettikenttiään, paramagnetismi kuitenkin katoaa heti, jos ulkoinen magneettikenttä poistetaan. Tavallisissa aineissa nimittäin hiukasten lämpöliikkeestä aiheutuvat voimat ovat niin paljon yksittäisten hiukasten magneettisia voimia suurempia, että satunnaiseen suuntaan tapahtuvat lämpövärähtelyt hajottavat saman tien minkään järjestäytyneen magnetismin, eli tökkivät yksittäisten atomien magneettikentät sikin sokin¹. Tällöin kappaleen magnetoituma häviää, eikä mitään pysyvää magneettikenttää pääse muo-

¹Feynman Lecturen mukaan (sivu 34-2) tähän riittää jokunen kymmenesosa Kelvin.



Kuva 4.1: Sinistä, paramagneettista nestemäistä happea, leijumassa magneetin napojen väliin. Kuva: Bob Burk, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liquid_oxygen_in_a_magnet.jpg

dostumaan, ellei ulkoinen magneettikenttä pidä sitä yllä. Rauta ja muut ferromagneettiset aineet ovat poikkeus, joka selittyy oudon kvanttimekaniikan avulla.

Atomien sisältämät elektronit muodostavat atomien sisällä pareja, jotka täyttävät kemiankursseilta tuttuja elektroniorbitaaleja. Yhteen orbitaaliin mahduttavat kaksi elektronia ovat spineiltään vastakkaissuuntaiset, jolloin nämä kumoavat toisensa, eivätkä aiheuta ulospäin näkyvää magnetismia. Aineen magneettiset ominaisuudet riippuvat näin siitä, miten elektronit ovat järjestäytyneet kvanttimekaniikan niille järjestämiin orbitaaleihin – ovatko ne kaikki pariutuneet toisen elektronin kanssa, vai jääkö yksi tai useampi elektroni ilman paria.

Paramagneettisten aineiden atomit sisältävät aina(?) vähintään yhden ilman paria jääneen elektronin. Yhdellä atomilla ei yksinään ole vielä merkittävää magneettikenttää, mutta se kuitenkin mahdollistaa sen, että paramagneettinen aine reagoi ulkoiseen magneettikenttään. Paramagneettisia alkuaineita on paljon, esimerkiksi litium, magnesium, natrium, alumiini, platina, titaani... Myös monet kemialliset yhdisteet ovat ominaisuuksiltaan paramagneettisia.

Atomit muodostavat tunnetusti isompia rykelmiä, joita nimitetään molekyyleiksi. Molekyylejä pitävät kasassa juuri nämä parittomat elektronit, jotka yhdistyvät toisten atomien vastaaviin. Joissain molekyyleissä kaikki elektronit löytävät parin, kun taas toisissa jää edelleen yksinäisiä elektroneja. Esimerkiksi ilmakehämme kaksi yleisintä kaasua, typpi ja happi, sisältävät molemmat kaksi atomia, mutta typessä kaikki elektronit löytävät parin, kun taas hapessa näin ei käy. Tämän takia typpi ei reagoi magneettikenttään, mutta paramagneettinen happi sen sijaan reagoi. Tavallinen jääkaappimagneetti siis vetää huoneilman happea puoleensa. Koska nämä kaasut ovat tavallisesti näkymättömiä, ei tätä silmin näe, mutta jos kaataa hauskan sinertävää nestemäistä happea² voimakkaaseen magneettiin, voi kiehuvan hapen nähdä jäävän kiinni magneettikenttään, kuten kuvassa 4.1³.

²Jonka lämpötilan on oltava alle hapen kiehumispisteen eli -183 astetta; tämä on vaikea saavuttaa kotikonstein, mutta internetin ihmeellisestä maailmasta löytyy hienoja videoita.

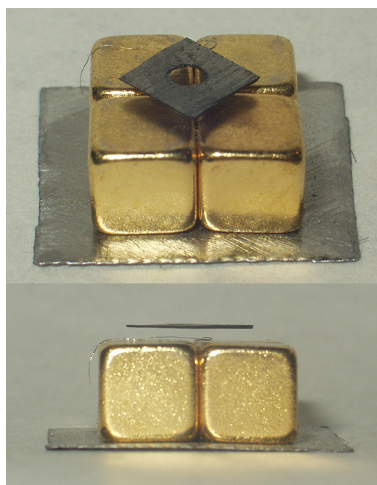
³Tästä löytyy myös hienoja videoita internetin syövereistä.

4.2 Ferromagnetismi

Ferromagnetismi eroaa paramagnetismista siinä, että ferromagneettisessa aineessa lähekkäiset atomit järjestäytyvät spontaanisti siten, että niiden magneettikentät ovat samansuuntaisia. Tämä selittyy monimutkaisella kvanttimekaniikalla, mutta yksinkertaistetusti, yksin jäävät elektronit ovat vähäenergisemmässä tilassa, jos niiden spin on samansuuntainen kuin naapurinsa – ja luonnossa asiat pyrkivät yleensä asettumaan vähäenergispään mahdolliseen tilaan. Tämä on erikoista, koska Paulin kieltoäännön mukaankin odottaisi, että vastakkaiset spinit olisivat naapurielektroneille suosiollisempi tila – ja näin tilanne onkin suurimmassa osassa aineita, ferromagneettiset aineet ovat poikkeus. Klassinen fysiikka ei ilmiötä pysty selittämään, eikä kvanttimekaniikkaan tarjoama selitys ole vielä aivan täysin ymmärretty. (Ainakin Feynmanin aikaan oli näin, ymmärretäänkö nykyään paremmin?)

Rauta ja muut ferromagneettiset aineet koostuvat yleensä pienistä kristalleista (hyvä termi? domain in english), joiden sisällä atomit ovat järjestäytyneet niin, että niillä on yhdensuuntainen magneettikenttä. Yhden tällaisen kristallin koko on tyypillisesti noin XXX. Jos kappale ei ole magnetisoitunut, on kunkin kristallin magneettikentän suunta satunnainen, ja eri suuntaiset magneettikentät kumoavat toisensa, eikä kappaleella ole ulospäin näkyvää magneettikenttää. Tässä tilassa kappaleella on pienempi energia, kuin jos kaikkien kristallien magneettikentät olisivat samansuuntaisia – taas luonnossa ollaan asetettu pienemmän energian tilaan, jos mikään ei erikseen sitä pyri muuttamaan. Voimakkaassa magneettikentässä nämä kristallit kuitenkin kääntyvät yhdensuuntaisiksi, ja kappale magnetisoituu. Siinä missä paramagneettinen aine menettää magnetisoitumansa kun ulkoinen magneettikenttä häviää, ferromagneettisen aineen magnetoituma pysyy. Näin epämagneettisen rautakimpaleen voi muuttaa magneetiksi, kun sen vie riittävän voimakkaaseen magneettikenttään, ja kappaleen sisäiset pikkumagneetit järjestäytyvät samansuuntaisiksi. Magnetoituman voi murtaa esimerkiksi iskemällä magneettia riittävän lujaa, vaikkapa vasaralla, jolloin sen sisäiset kristallit heilahtavat ja menettävät yhteneväisen magneettikenttänsä. Kristallien sisällä atomien yhteneväiset magneettikentät silti säilyvät.

Magnetoituneet aineet pysyvät magneettisina niin kauan, kun mikään (esimerkiksi vasaranisku) ei hajota niiden sisäistä järjestystä. Mutta vaikka aine saisi olla täysin omassa rauhassaan, ovat sen hiukkaset jatkuvassa lämpöliikkeessä. Jos lämpötila on riittävän korkea, riittää tämä lämpöliike hajottamaan magnetoitumista ylläpitävän järjestyksen. Tätä lämpötilaa nimitetään Curien pisteeksi, ja sitä korkeammassa lämpötiloissa ferromagneettinen aine menettää magneettiset ominaisuutensa. Ferromagneettinen aine muuttuu paramagneettiseksi. Esimerkiksi raudan Curien piste on 1043 Kelviniä, nikkelin 627, ja koboltin 1400.



Kuva 4.2: Diamagneettinen grafiitin pala levitoidi neodymiumista koostuvan magneetin yllä.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamagnetic_graphite_levitation.jpg

4.3 Diamagnetismi

Diamagnetismi on magnetismin muodoista heikoin. Sitä esiintyy kaikissa aineissa, mutta para- ja ferromagneettisissa aineissa diamagnetismin vaikutus on huomattavan paljon näitä heikompi. Diamagneettisiksi aineiksi kutsutaankin niitä aineita, joissa ei esiinny muun tyyppistä magnetismia. Yleensä diamagneettisia aineita ei siis ajatella magneettisiksi ollenkaan. Nämä aineet ovat sellaisia, jotka sisältävät parillisen määrän elektroneita, jotka vielä jakautuvat tasan, siten, että kaikki löytävät itselleen parin, joiden spinin kumoavat toisensa. Näin diamagneettisesta aineesta ei jää ulospäin näkyviä voimakkaita magneettisia ominaisuuksia.

Diamagneettiset materiaalit vastustavat ulkoista magneettikenttää, sillä ne pyrkivät aina muodostamaan oman magneettikenttensä, joka kumoaisi ulkoisen kentän. Diamagneettisissa aineissa, eli periaatteessa aivan kaikissa aineissa (para- tai ferromagneettisissa aineissa tämä ilmiö vain häviää voimakkaammille magneettisille efekteille) syntyy ulkoisen magneettikentän muuttuessa pienen pieniä sähkövirtoja, jotka taas synnyttävät oman magneettikenttensä, joka pyrkii vastustamaan magneettikentän muutosta. Eli jos magneettikenttä voimistuu, pyrkii diamagneettinen aine heikentämään magneettikenttää sisällään, ja kentän heiketessä taas aine pyrkii vahvistamaan sitä⁴. Sen takia magneetit aiheuttavat heikon hylkivän voiman diamagneettisiin aineisiin, siinä missä ne vetävät para- ja ferromagneettisia aineita puoleensa huomattavasti voimakkaammin. Kuvassa 4.2 näkyy kappale diamagneettista grafiittia, joka levitoidi magneetin yllä tämän

⁴Tällöin muuttuva magneettikenttä indusoi (myöhempi luku?) sähkövirran, jonka suunta määräytyy Lenzin lain mukaan.

hylkivän voiman vaikutuksesta.

Diamagnetismi ei siis ole minkään tiettyjen magneettisten aineiden ilmiö, vaan yleinen kaikissa atomeista koostuvissa aineissa havaittava ilmiö. Sen voisi tiivistää niin, että aina, kun magneettikentässä tapahtuu muutoksia, ne synnyttävät kaikissa atomeissa pieniä sähkövirtoja, joista taas syntyy oma magneettikenttensä, joka pyrkii kumoamaan magneettikentän ulkoiset muutokset.

Tavallisesti diamagnetismi on hyvin heikkoa, mutta suprajohteet ovat täydellisiä diamagneetteja, sillä ne eivät päästä lainkaan magneettikenttää sisälleen. Suprajohtava aine menettää kaiken sähköisen ominaisvastuksensa kun sen lämpötila laskee riittävän alhaiseksi. Yleensä suprajohtavuus vaatii hyvin alhaisia lämpötiloja, lähellä absoluuttista nollaa⁵, ja huoneenlämmössä toimiva suprajohdin olisikin tavattoman kova juttu. Ymmärtäen, että sähköjohdin, missä ei tule minkäänlaisia häviöitä matkalla, ja joka ei vaadi hillittömiä jäähdytyslaitteita, olisi erittäin käyttökelpoinen moniin käytännön sovelluksiin.

Suprajohtavassa aineessa ei siis ole lainkaan sähkövastusta. Jos magneettikenttä pääsisi aineen sisälle, aikaansaisi magneettikentän muutos Maxwellin lakien mukaan myös sähkökentän. Sähkövastuksen ollessa nolla, synnyttäisi pienikin sähkökenttä äärettömän sähkövirran. No, ääretöntä sähkövirtaa ei synny, sillä suprajohteen sisällä ei voi olla sähkökenttää – eikä näin ollen muuttuvaa magneettikenttää. Kyseessä on siis täydellinen diamagneetti. Suprajohtavuus kuitenkin katoaa, korkean lämpötilan ohella, myös liian voimakkaassa magneettikentässä.

4.4 Muita magnetismin muotoja

Magnetismin kolmen tavallisen muodon – dia-, para- ja ferromagnetismin – lisäksi, joissain aineissa esiintyy myös erikoisempia magneettisia ominaisuuksia. Antiferromagneettisissa aineissa vierekkäisten atomien elektronien spinit järjestäytyvät hyvin systemaattisesti, kuten tavallisessa ferromagnetismissä – mutta nyt naapurispinit ovat vastakkaisuuntaisia, kuten Paulin kieltoäännön kautta voisi veikatakin. Tällainen aine on periaatteessa hyvinkin magneettista, mutta tämä magnetismi ei näy ulospäin, sillä se kumoaa itse itsensä äärimmäisen tehokkaasti. Esimerkiksi kromi, joka sijaitsee alkuaineiden jaksollisessa järjestelmässä lähellä ferromagneettisia rautaa, kobolttia ja nikkeliä, on antiferromagneettinen aine.

Jotkin yhdisteet käyttäytyvät kuten antiferromagneettiset aineet, mutta ovat (kaikista yksinkertaisimmassa esimerkissä) järjestäytyneet siten, että joka toinen atomi on yhtä alkuainetta ja joka toinen toista. Jos myös atomeista yli jäävät spinit ovat järjestäytyneet samoin, on yhdenlaisilla atomeilla aina samansuuntainen magneettikenttä (magneettinen momentti!!!) ja toisenlaisilla vastakkaisuuntainen. Näiden magneettikenttien/momenttien voimakkuus ei kuitenkaan ole välttämättä sama. Jos toisenlaisilla atomeilla on suurempi vaikutus

⁵Esimerkiksi vuonna 1911 ensimmäinen löydetty suprajohde, elohopea, muuttui suprajohdantavaksi 4 Kelvin-asteen lämpötilassa.

magnetoitumaan kuin toisilla, eivät nämä magneettikentät kumoa täysin toisiaan, ja jäljelle jää ulospäin näkyvä magneettikenttä. Esimerkiksi vanhin tunnettu magneettinen materiaali, magnetiitti, on ferrimagneettinen aine. Magnetiitti on luonnossa esiintyvä rautamalmimineraali, tarkemmin sanottuna rautaoksidi (kemialliselta kaavaltaan Fe_3O_4), joka sisältää kolme rautaionia sekä neljä happiatomia.

On olemassa myös eräitä aineita, jotka ovat magneettisilta ominaisuuksiltaan vieläkin erikoisempia, mutta niihin ei tässä ole tarpeen mennä. Tähtitieteellisestä näkökulmasta ajateltuna erilaisten aineiden magneettisilla ominaisuuksilla ei myöskään ole suurtakaan merkitystä, vaikka ne kovin kiehtovia ovatkin, antaen hyvän esimerkin siitä, miten joitakin arkiskaaloissa näkyviä ilmiöitä ei pystytä selittämään ilman kvanttimekaniikkaa. Yksittäisten ferromagneettisten kappaleiden magneettikentät ovat kuitenkin hyvin pieniä, vaikka paikallisesti voimakkaita ovatkin. Kun tarkastellaan maapalloa tai sen ulkopuolista avaruutta, syntyvät kaikki näillä mittakaavoilla vaikuttavat magneettikentät sähkövirroista, eivätkä atomien sisäiset magneettiset ominaisuudet vaikuta niihin juurikaan.

KUVIA!

Luku 5

Arkielämän magnetismia

Arkielämässämme magnetismi tulee vastaan esimerkiksi jo mainittujen jääkaappimagneettien muodossa. Nämä, sekä muut kappaleet, joita yleisesti ottaen nimitämme ”magneeteiksi”, koostuvat ferromagneettisista aineista, jotka ovat magnetisoituneet, eli aineen sisäiset magneettikentät ovat järjestäytyneet siten, että ne vahvistavat toisiaan. Näin saadaan aikaan riittävän suuri magneettikenttä, jotta magneetti vetää puoleensa ferromagneettisista aineista, kuten raudasta, koostuvia pieniä kappaleita.

Toinen arkielämästä tuttu ilmiö, joka perustuu magnetismille, on induktio. Sitä ei ehkä heti tulisi ajatelleeksi, mutta nykyään yleiset induktioliedet toimivat täysin sähkömagnetismin lakien puitteissa. Sähkömagneettisessa induktiossa muuttuva magneettikenttä aikaansaa sähkövirran. Tätä hyödynnetään induktioliesissä, jotka siis synnyttävät nopeasti vaihtelevan magneettikentän, kun lieden kytkee päälle. Tämä magneettikenttä aiheuttaa sähköä johtavassa metallikattilassa sähkövirtoja, jotka kuumentavat kattilaa huomattavan paljon tehokkaammin kuin perinteiset liedet, joissa sähkövirta kulkee keittolevyn läpi, kuumentaa sitä, ja tämä lämpö siirtyy kattilaan, ilman vinhaan poukkoilevaa indusoivaa magneettikenttää.

Induktion vastakohta on dynamo??? Polkupyörän valona käytetyt dynamoset C-kasetit!

Luku 6

Magnetismi teknologiassa

C-kasetit, VHS, magneettiset junaradat, hiukkaskiihdyttimet, magneettikuvantamiset (MRI)...

Magnetismille on luonnollisesti kehitetty lukuisia teknologisia sovelluksia. Näistä vanhin lienee kompassi – jo XXX Kiinassa (?) huomattiin, että tiettytyypiset neulat asettuvat aina samaan asentoon, mikä siis johtuu Maan magneettikentästä, jonka mukaan magnetoitunut kompassineula asettuu. Edellä käsiteltiin arkielämässä läsnä olevia magnetismin muotoja. Nykyajan sähköistyneessä yhteiskunnassa magneettikentät ovatkin läsnä lähestulkoon kaikkialla. Tässä luvussa käsitellään.....

Kela, käämi....

Magnetismi tarjoaa tapoja tallentaa tietoa. Vanhat C-kasetit ja VHS-kasetit... Yksinkertainen kovalevy, bitit magneettisia...

Magneettikenttiä käytetään tilanteissa, joissa täytyy pystyä hallitsemaan sähköisesti varattua ainetta, kuten kuumaa plasmaa. Fuusioreaktorit, ITER...

Kaikista vahvimpia ihmisten luomia magneettikenttiä syntyy valtavissa hiukkaskiihdyttimissä. NOT TRUE. Jo moderni television näyttö pitää sisällään pienen hiukkaskiihdyttimen (?), mutta kaikista suurimmissa hiukkasfysiikan laboratorioissa suunnattomat magneettikentät pyrkivät kiihdyttämään sähköisesti varattuja hiukkasia niin suuriin nopeuksiin, että toisiinsa törmäillessä ne saadaan hajotettua osiin – esimerkiksi protonit saadaan näin hajotettua kvarkeiksi. Suurimmassa olemassa olevassa hiukkaskiihdyttimessä, CERNin LHC:ssä (Large Hadron Collider) Sveitsin ja Ranskan rajalla, voimakkaimmat ihmiskunnan synnyttämät magneettikentät (?) kohoavat Y teslan lukemiin. Tämä on jo suunnattoman voimakas magneettikenttä, jonka vahvuisia ei luonnossa kovin paljon löydy. Vain kaikista voimakkaimmat magneettikentät, esimerkiksi neutronitähtien pinnalla, peittoavat voimakkuudeltaan ne, joilla protoneita hajotetaan CERNissä osasiinsa.

Voimakkain laboratoriossa luotu magneettikenttä.... (Ei ole CERNissä) Tämä on nopeasti vaihtuva kenttä...

Sen sijaan voimakkain vakaana pysyvä laboratoriossa luotu magneettikenttä on Kiinalaisten tutkijoiden Steady High Magnetic Field Facility -laitoksessa

vuonna 2022 saavuttama 45 teslan magneettikenttä. Jos 45 teslaa ei vielä kuulosta maailmanennätykseksi kovin huikealta, niin se johtuu käytetystä yksiköstä – yksi tesla on nimittäin jo hyvinkin paljon. Maapallon ja tähtienkin magneettikentissä puhutaan mikro- ja millitesloista.

Luku 7

Sähkömagneettinen dynamo

Suuren mittakaavan magneettikentät, esimerkiksi planeetoissa, tähdissä ja galakseissa, saavat yleensä alkunsa jatkuvista sähköisesti varautuneen aineen virtauksista. Tällaista prosessia, missä aineen liike-energiaa muuttuu sähkömagneettiseksi energiaksi, kuten magneettikentäksi tai sähkövirraksi, kutsutaan sähkömagneettiseksi dynamoksi. Dynamo on siis tavallaan vähän kuin induktion vastakohta. (?)

Arjesta tuttu esimerkki on polkupyörän dynamo. Se sisältää pienen magneetin, joka liikkuu kun pyörää poljetaan. Näin saadaan aikaan muuttuva magneettikenttä, joka Maxwellin yhtälöiden mukaisesti aikaansaa sähkövirran, joka taas polkupyörän lampun loistamaan.

Koska ferromagneettiset aineet ovat maailmankaikkeudessa kokonaisuudessaan jokseenkin harvinaisia (tunnetusta aineesta vain prosentin luokkaa on mitään muuta kuin vetyä ja heliumia), ovat dynamot tehokkain tapa tuottaa suurikokoisia magneettikenttiä. Esimerkiksi Maan, Auringon ja Linnunradan magneettikentät ovat kaikki peräisin omista dynamoistaan.

Toimiva dynamo vaatii sähköisesti varattua ainetta, sekä energianlähteen joka pitää aineen liikkeessä. Tarkastellaan ensin Auringon ja muiden tähtien dynamoja. Ensimmäinen vaatimus on, että aineen, tai ainakin riittävän suuren osan siitä, täytyy olla sähköisesti varattua. Tähdet ovat niin kuumia, että niiden atomit (joista valtaosa on vetyä ja heliumia) ovat menettäneet elektroninsa, jolloin atomiytimet ovat positiivisesti varattuja, ja vapaat elektronit negatiivisesti. Aine on siis plasmaa, joka on sähköisesti varattua. Ja mikä tätä plasmaa sitten liikuttaa? Tähän löytyy kaksi tekijää, joita kumpaakin vaaditaan toimivaan dynamoon. Ensinnäkin, tähdet pyörivät. Ajan myötä niiden pyöriminen yleensä hidastuu, mikä heikentääkin dynamoa, mutta käytännössä pyöriminen ei koskaan pysähdy kokonaan. Toiseksi, tähtien energianlähteenä toimivat fuusioreaktiot tuottavat jatkuavasti energiaa tähtien sisuksissa, joka kuumentaa tähtiä sisältä päin. Tämä lämpö virtaa ylöspäin tähden läpi, aikaansaaden monimutkaisia virtauksia tähden eri kerroksissa. Kuuma kaasu virtaa ylöspäin, ja päästyään tähden pinnalle, säteilee se energiansa ympäröivään avaruuteen tähden loistamana valona. Säteillessään energiaa menemään, kaasu viilenee, ja sitten viileämpä kaasu vajoaa takaisin alas.

Kuten olemme oppineet, liikkeessä olevat sähkövaraukset muodostavat magneettikentän. Siispä, tähdelle, joka on täynnä jatkuvassa liikkeessä olevaa sähköisesti varattua plasmaa, syntyy magneettikenttä. Ja koska dynamo toimii jatkuvasti, tähden pyöriessä vakaasti miljoonia vuosia¹, ja sen ytimen fuusioreaktiot tuottavat tasaiseen tahtiin lisää energiaa ylläpitämään ylös ja alas suuntautuvia virtauksia, pysyy magneettikenttä vakaana. Tai ei täysin vakaana – esimerkiksi Auringon magneettikenttä uusiutuu toistuvissa, noin vuosikymmenen mittaisissa sykleissä. Dynamo onkin *dynaaminen* prosessi, eli muodostuva magneettikenttä muuttuu jatkuvasti, aina vain toistuvissa sykleissä. Nämä syklit toistuvat kohdallaisen vakaana, vaikkakin erot syklien välillä saattavat olla merkittäviä, kuten näemme luvussa X.

Suhde induktioon...?

¹Miten nopeasti pyöriminen hidastuu?

Luku 8

Maapallon magneettikenttä

Tähtitieteellisten kohteiden magneettikentistä meille tutuin lienee oman planeettamme, Maan, magneettikenttä. Maalla on planeetaksi kohtalaisen voimakas magneettikenttä, joka syntyy planeetan ytimen sulien ulko-osien virtauksista. Maan ydin koostuu pääosin raudasta ja nikkelistä – ferromagneettisista aineista. Tästä voisi kuvitella, että ytimen ferromagnetismi ylläpitäisi magneettikenttää – näin ei kuitenkaan ole. Sulassa ulko-ytimessä vallitsee noin 4000 asteen lämpötila, ja vielä sisemmällä, valtavan paineen takia kiinteän olomuodon saaneessa sisäytimessä vielä lämpötila on vielä korkeampi, 6000 astetta. Nämä lämpötilat ylittävät sekä raudan että nikkelin Curien pisteen (1043 raudalle, 627 nikkelille (Kelvineissä!)). Curien pisteen ylittävissä lämpötiloissa ferromagneettinen aine menettää magneettiset ominaisuutensa. Mutta sula metalli johtaa sen sijaan hyvin sähköä, joten ulkoytimen rauta-nikkelseoksen virtauksissa syntyy myös suunnattomia sähkövirtoja. Näitä ylläpitävät maapallon pyöriminen sekä Maan ytimen radioaktiivisten aineiden hajoamisesta vapautuva lämpö. Nesteen virtaukset siis liikuttelevat sähköä johtavaa ainetta, mistä saa alkunsa Maan magneettikenttä. Eli sähkömagneettinen dynamo.

Magneettikentän voimakkuus.... muoto.... liike....

Meille eläville olennoille Maan pinnalla planeettamme magneettikenttä on elintärkeä. Se suojaa meitä korkea-energisiltä kosmisilta säteiltä, jotka suoraan meihin osuessaan aiheuttaisivat jatkuvasti vakavia soluvaurioita. Koska kosminen säde on avaruudesta saapuva varattu hiukkanen, tuntee se magneettikentän vaikutuksen, eikä näin ollen pääse kulkemaan vapaasti Maan pinnalle (myöskin ilmakehä suojelee meitä MITEN). Koska magneettikenttä on muodoltaan dipolimainen (eli kaksinapainen), ohjaa se suuren määrän Auringosta jatkuvasti saapuvaa hiukkaspommitusta (aurinkotuuli sekä koronan massapurkaukset, ks. luku X) etelä- ja pohjoisnavan ympäristöön. Siellä nämä kosmiset aurinkohidut pääsevät osumaan yläilmakehän molekyyliin, ja virittävät niitä, eli antavat atomien elektroneille hiukan lisäenergiaa. Kun tämä viritystila purkautuu, syntyy siitä säteilyä, jonka pystymme näkemään revontulina. Esimerkiksi happimolekyylin (?) tavanomaisimman (?) viritystilan purkautuminen näkyy vihreänä valona, mikä onkin revontulten tyypillisin väri.

Magneettikentän tarjoaman elintärkeän suojan sekä kauniiden revontulten lisäksi planeettamme magneettikenttä tarjoaa myös kätevän tavan suunnistaa. Jo ennen ajanlaskun alkua Kiinassa keksittiin, että tietyt magneettiset kivet suuntautuvat luontaisesti aina samoin päin. Vuosituhatta myöhemmin kompassi oli otettu suunnistuskäyttöön, kehittämällä laite, missä magnetisoitunut neula voi pyöriä vapaasti. Kompassin neula siis asettuu ympäröivän magneettikentän suuntaisesti, ja jos lähistöllä ei ole muita merkittäviä magneettikenttiä synnyttäviä kappaleita, kertoo se kantajalleen Maan magneettikentän suunnan. Tämä on melko lähelle etelä-pohjoissuuntainen, jos ei olla aivan napa-alueilla. Tätä magnetismin perustuvaa suunnistustapaa käyttävät niin merenkulkijat, suunnistajat kuin monet muuttolinnutkin.

Magneettikentän anomalia, isot rautaesiintymät

Luku 9

Magneettikenttiä muilla planeetoilla

Maa ei suinkaan ole ainoa planeetta jolla on oma magneettikenttensä. Jos planeetalla on sula ydin, ja riittävästi voimia sitä liikuttelemaan eli ylläpitämään dynamoa, syntyy sille oma magneettikenttensä. Jos ydin on kylmä ja kuollut, ei magneettikenttää sen sijaan synny.

Aurinkokuntamme sisin planeetta, Merkurius, pystyy hitaalla pyörimisellään¹ ylläpitämään dynamoa, joka muodostaa heikon magneettikentän, joka on voimakkuudeltaan noin 1% Maan magneettikentästä. Merkuriuksen hitaan pyörimisen takia planeetan magneettikentän löytyminen oli hienoinen yllätys, kun Mariner 10 luotain lensi planeetan ohi vuonna 1974. Se vaikuttaisi kuitenkin riittävän heikon magneettikentän muodostamiseksi.

Vielä hitaammin pyörivällä Venuksella sen sijaan ei ole dynamoa, eikä siten omaa magneettikenttää. Tästä huolimatta Venuksella löytyy hyvin heikko magneettikenttä, joka saa alkunsa aurinkotuulesta, eli Auringosta tulevista sähköisesti varatuista hiukkasista, jotka kantavat Auringon magneettikenttää mukanaan ja vuorovaikuttavat Venuksen ionosfääriin, eli kaasukehän sähköisesti varattujen hiukkasten kanssa. Venuksen magneettikenttä ei siis synny planeetasta itsestään, vaan sen aiheuttaa planeettaa jatkuvasti pommittava aurinkotuuli.

Marsilla ei myöskään ole voimakasta magneettikenttää, joskin on löydetty viitteitä siitä, että joskus siellä on sellainen ollut...

Aurinkokuntamme planeetoista voimakkain magneettikenttä on planeetoista suurimmalla, Jupiterilla. Jupiterin pinnalla magneettikentän voimakkuus on samaa luokkaa kuin Auringossa, jos katsotaan Auringon rauhallisia osia, eikä erityisen aktiivisia auringonpilkkuja – lisää näistä seuraavassa luvussa.

Saturnus, Uranus, Neptunus

Taulukko planeettojen magneettikenttien voimakkuuksista?

Eksoplaneetat

¹Ja Maata enemmän jäähtyneellä ytimellään; varmaankin koska ohuempi kuori eristämässä sitä...

Luku 10

Auringon magneettikenttä

Maapallon ohella toinen kappale, jonka magneettikenttä vaikuttaa meihin suu-
resti, on Aurinko. Auringon pinnalta pakenee jatkuvasti varattuja hiukkaisia,
aurinkotuulta, jotka etenevät aurinkokunnan halki Auringon magneettikentän
muodostamaa spiraalia myötäillen. Tämä spiraali, jota usein kutsutaan Parke-
rin spiraaliksi (katso kuva 10.1), ilmiön ennustaneen Eugene Parkerin mukaan,
syntyy Auringon pyörimisestä: aurinkotuuli kantaa magneettikenttää ulospäin
Auringosta, mutta Aurinkopa pyörii jatkuvasti, vetäen magneettikentän sisäosia
mukanaan. Maahan osuessaan aurinkotuulen hiukkaset aiheuttavat revontulia,
ja avaruustekniikka sekä avaruuskävelyitä tekevät astronautit on suojattava
tarkkaan sen vaikutuksilta.

Magneettikentän voimakkuus Auringon pinnalla on kymmenisen kertaa voi-
makkaampi kuin Maan pinnalla, eli samaa luokkaa Jupiterin magneettikentän
kanssa. Auringon pinnalta kuitenkin löytyy usein alueita, joissa magneettikenttä
on tiivistynyt tuhat kertaa voimakkaammaksi. Näihin alueisiin muodostuu au-
ringonpilkkuja, eli tummia läiskiä, jotka ovat Auringon tarkkailijoille tuttuja,
sillä niitä on helppo havaita jo pienellä kaukoputkella, jos se on varustettu asian-
mukaisilla suojavälineillä Auringon katsomiseksi. Auringonpilkuissa magneetti-
kenttä lähentelee jo yhden teslan voimakkuutta. (Tesla on yksikkönä melkoisen
suuri, tämän takia toisinaan käytetäänkin gausseja, joissa ilmaistuna auringon-
pilkut ovat voimakkuudeltaan jo tuhansia gausseja.)

Auringonkin magneettikenttää ajaa dynamo tähtemme sisuksissa....

Auringolla on luultavasti kaikista tähtitieteellisistä kappaleista eniten tut-
kittu magneettikenttä, jonka käyttäytymisestä tunnetaan eniten yksityiskohtia.
Auringossa on nimittäin havaittavissa valtava määrä erilaisia magneettisia il-
miöitä. Auringonpilkkujen ja aurinkotuulen lisäksi Auringon magneettikenttä
aiheuttaa erilaisia purkauksia, kuten roihuja eli flareja, sekä koronan massapur-
kauksia.

Lisäksi näiden erilaisten magneettisten ilmiöiden esiintyminen vaihtelee kes-
kimäärin noin yhdentoista vuoden selkeässä syklissä. Tämä alunperin auringon-
pilkkujaksona tunnettu sykli hoksattiin 1800-luvulla, kun saksalainen Samuel
Heinrich Schwabe huomasi kyseisen jaksollisuuden auringonpilkkujen määrässä.



Kuva 10.1: Auringon magneettikenttä muodostaa Parkerin spiraalin, joka ylettyy planeettojen kiertoradoille ja kauas niiden taakse. Kuva: NASA.

Silloin sitä ei vielä osattu yhdistää Auringon magneettikenttään, mutta tutkimuksen kehittyttyä, on auringonpilkut osattu yhdistää magneettikenttiin, ja selvitetty magneettikentässä tapahtuvien muutosten olevan niin auringonpilkkujen vaihtelevuuden, kuten myös aurinkotuulella, roihuissa ja koronan massapurkauksissa esiintyvän jaksollisuuden takana. Suurinpiirtein kerran vuosikymmenessä nimittäin Auringon magneettikenttä vaihtaa suuntaa. Samoin käy Maan magneettikentällekin, mutta tämä on paljon hitaampi ja vähemmän säännöllinen prosessi, missä aikaa kuluu satojatuhansia (?) vuosia. Auringon tapauksessa ilmiötä on sen sijaan helpompi tutkia, sillä satoja vuosia jatkuneista aurinkohavainnoista voidaan jo löytää kymmeniä erillisiä syklejä. Nykyajan aurinkotutkijat saavatkin kiittää Galileo Galileita ja muita varhaisia auringonpilkkuhavaintasijaita, jotka jo 1600-luvun alussa alkoivat tarkkaan merkitä muistiin havaintojaan, jotka ovat säilyneet tähän päivään, vaikkei heillä silloin ollut mitään käsitystä kaikesta siitä, mihin heidän havaintojaan myöhemmin voitaisiin käyttää. Yhteys aurionpilkkujen ja magneettikenttien välillä keksittiin vasta 1900-luvun alussa. Tällöin tutkijoilla olikin valmiiksi käytössään kolmen-sadan vuoden mittainen havaintoaineisto, jonka perusteella he saattoivat sanoa Auringon magneettisen syklin jatkuneen jo satoja vuosia, vaikka koko magneettikenttä oli vasta löydetty tähtemme pinnalta!

Mutta mitä Auringossa tapahtuu noin yhdentoista vuoden välein, mikä saa magneettikentän vaihtamaan suuntaansa? Vastataksemme tähän kysymykseen on meidän esiteltävä kaksi Auringon dynamoajavaa ilmiötä: differentiaalirotaatio sekä konvektio.

Differentiaalirotaatio on hieno ilmaus sille, että eri osat Auringosta pyörivät eri tahdissa. Aurinko tekee yhden kierroksen itsensä ympäri noin yhdessä kuukaudessa, mutta tarkemmin katsottuna selviää, että ekvaattorin eli päiväntasaajan

alueet pyörivät hieman nopeammin, yhden kierroksen noin 25 päivässä, kun taas napa-alueilla pyöriminen on hitaampaa, ja kierrokseen menee noin 35 päivää. Tämä johtaa siihen, että Auringon pyöriessä magneettikenttä sen pinnalla venyy epätasaisen pyörimisen mukana. Kun tätä venymistä jatkuu vuosia, ajautuvat magneettiset kenttäviivat lähemmäs toisiaan, mikä samalla voimistaa magneettikenttää.

Samaan aikaan Auringossa tapahtuu jatkuvasti konvektiota. Tämä taas tarkoittaa, että kaasua liikkuu Auringon pinnalla ylös ja alas. Ydinfuusiot tähden sisuksissa tuottavat jatkuvasti energiaa, joka lämmittää kaasua alhaalapäin. Kuuma kaasua kohoaa ylemmäs Auringon pintaosien läpi, ja jäähtyttyään putoaa takaisin alas. Tämä konvektioliike vetää myöskin magneettikenttää mukanaan. Konvektion uskotaan myös aiheuttavan differentiaalirotaation, mutta tästä mekanismista ei vielä olla täysin perillä. (Simulaatiot tuottavat usein anti-solar differentiaalirotaatiota, joskin Hotta & Kusano 2021, NatAs, sai sen oikein.)

Kun differentiaalirotaatio on voimistanut pinnan magneettikenttää riittävästi, alkaa näiden tekijöiden yhteisvaikutus synnyttää kenttään hyvin vaikeasti ennustettavia kiemuroita. Ylöspäin kulkevan virtauksen nostaessa tällaisen Auringon pinnan läpi, syntyy voimakas magneettinen silmukka. Tällaisen silmukan kohdalla kuuma kaasua ei nouse enää tehokkaasti pinnalle: silmukan kohdalle muodostuu auringonpilkkua.

Auringon ollessa aktiivisimmassa vaiheessa, muodostuu näitä silmukoita ja lenkuroita kaikista eniten. Tällöin auringonpilkkujen määrä on suurimmillaan, ja revontulienkin näkemisen todennäköisyys on suurimmillaan. Mutta kun nämä Auringon pinnan magneettiset lenkurat alkavat tulla liian usein liian tiiviisti lähelle toisiaan, rikkoutuvat kenttäviivat lopulta. Yleensä viivat vain venyvät, mutta voimakkaassa magneettikentässä ne saattavat hajota, ilmiössä joka on nimeltään magneettinen rekonnektio. Konvektio järjestelee näitä hajoineita kenttäviivoja uudelleen, ja lopulta palataan lähtötilanteeseen, eli dipolin (?) muotoiseen kenttään – sillä erotuksella, että magneettikenttä on vaihtanut suuntaa, eli etelä- ja pohjoisnapa paikkoja. Ja differentiaalirotaation alkaessa jälleen venyttää magneettikenttää, alkaa sama prosessi uudestaan. Aikaa tähän siis kuluu se yksitoista vuotta.

Luku 11

Magneettiset tähdet

Aurinko on meidän lähitähtenämme luonnollisesti selvästi parhaiten tunnettu tähti. Nykyään muiltakin tähdiltä kuitenkin tunnetaan vastaavanlaisia magneettikenttiä. Tähtien magnetismin lait on itse asiassa pystytty päättämään melkoisen hyvin, siitäkkin huolimatta, että kaikki muut tähdet ovat käsittämättömän kaukana meistä, eikä niistä muutamaa poikkeusta lukuunottamatta näy parhailakaan teleskoopeilla pientä pistettä enempää.

Muiden tähtien pinnasta ei voi tehdä yksityiskohtaisia havaintoja, kuten Auringosta. Mutta vaikka tähden valo näyttää tulevan kaikki samasta pisteestä¹, pystyy tähden valosta silti päättämään uskomattoman paljon asioita. Kun valo hajotetaan eri aallonpituuksiinsa, saadaan mitattua tähden spektri. Se siis kertoo, kuinka iso osa tähden valosta on sinistä, vihreää, keltaista, punaista, ja niin edelleen. Kun mitataan, mihin suuntaan valon sähkö- ja magneettikentät heiluvat milläkin aallonpituuksilla, saadaan mitattua spektrin polarisaatio. Menemättä tarkempiin yksityiskohtiin, todettakoon vain, että valon spektrejä ja polarisaatiota tutkimalla voidaan selvittää magneettikenttien suuntaa ja voimakkuutta niin tähtien pinnalla, tähtienvälisissä kaasupilvissä kuin galaksien valtavissa kierteishaaroissakin.

Tähdet syntyvät valtavan kaasun ja pölypilven romahtaessa kasaan oman painovoimansa alla. Syntyessään tähdet pyörivät nopeasti; neljän ja puolen miljardin vuoden ikäinen Aurinkohan pyörähtää yhden kierroksen itsensä ympäri noin kuukaudessa, mutta vastasyntyneet tähdet saattavat tehdä kiepsahduksensa alle vuorokaudessa. Entä mitä tämä nopeampi pyöriminen tarkoittaa magneettikentän suhteen? Mitä enemmän vauhtia sähkövarauksiin saadaan, sitä voimakkaampi magneettikenttä saadaan aikaan. Nuorilla tähdillä siis on lähtökohtaisesti voimakkaampi magneettikenttä, ja samaiset magneettiset ilmiöt, joita Auringossakin nähdään, ovat näissä tähdissä paljon voimakkaampia. Tämä tarkoittaa suurempia tähdenpilkkuja sekä voimakkaampia tähtituulia, roihupurkauk-

¹Jos tähden näennäinen koko Maasta katsottuna on pienempi kuin kaukoputken erotuskyky, näkyy tähti pistekohteena. Vain muutamasta yksittäisestä tähdessä on suurimmilla teleskoopeilla pystytty erottamaan yksityiskohtia tähden pinnalta, tunnetuimpana näistä kenties Betelgeuze.

sia ja koronan massapurkauksia. Sanotaan, että nuoret tähdet ovat magneettisesti aktiivisempia, kuin vanhemmat, rauhalliseen keski-ikään päässeet Aurin-gon kaltaiset tähdet. Vuosimiljoonien ja -miljardien aikana tähden pyöriminen hidastuu, koska tähden pyörimismäärää siirtyy tähdestä pakenevien, ja magneettikentän spiraalirakennetta seuraavien hiukkasten mukana ulkoavaruuteen – pyörimismäärän säilyminen on nimittäin yksi fysiikan pyhimmistä säännöistä. Eli jos joku osa tähdestä, kuten koronasta pöllähtävä massapurkaus, jatkaa jonkin sortin pyörimisliikkeessä, kuten se tekeekin joutuessaan kiertämään spiraali-maista magneettikenttää kulkiessaan ulospäin, täytyy lopputähden pyörimisen vastaavasti hieman hidastua.

Aktiivisia tähtiä tutkiessa on tehty myös aikamoisen hurjia löytöjä. Aurin-gonpilkut kalpenevat tyystin niiden valtaviin tähdenpilkkujen rinnalla, joita eräistä tähdistä on löydetty. Joissain tapauksissa pilkku saattaa peittää lähes puolet koko tähdestä, ja olla koko Aurinkoa suurempi. Siitä ei tosin ole täyttä varmuutta, onko kyseessä todella samanlainen, yksittäinen, suunnaton ympäristöään kylmempi alue, kuin auringonpilkut, vai olisiko kyse pikemminkin isommas-ta ryppäästä pienempiä pilkkuja, joita ei näin kaukaa pysty erottamaan yksittäisiksi pilkuksi.

Osa näistä aktiivisista tähdistä on myös vanhempia, vaikkapa nyt Auringon ikäisiä tähtiä, joiden pyörimisen lähtökohtaisesti luulisi hidastuneen, johtaen tähden magneettisen aktiivisuuden laskuun. Näiden tähtien magnetismi pystytään selittämään muutamalla eri tavalla. Yleensä kyseessä on kaksoistähtijärjestelmä, jossa tähtien pyöriminen on niin sanotussa vuorovesilukossa, eli tähdet kääntävät aina saman puolen toisiaan päin. Siis samalla tavalla kuin Kuu näyttää aina saman puolen Maata päin. Vuorovesilukossa pyörivä tähti pystyy pitämään yllä nopeampaa pyörimistä pitempiä aikoja, jolloin magneettinen aktiivisuus voi säilyä paljon vanhemmalle iälle. Näitä tähtiä kutsutaan nimellä RS CVn, prototyypinsä mukaisesti². Jos nämä kaksoistähdet ovat hyvin lähekkäin, saattavat ne lopulta jopa törmätä toisiinsa. Tähtienväliset törmäykset ovat äärimmäisen harvinaisia, ja niitä tapahtuukin käytännössä vain lähekkäisissä kaksoistähtipareissa. Tämän harvinaisen tapauksen sattuessa saattaa törmäyksestä jäljelle jäävän, yhdistyneen tähden pyöriminen nopeutua joksikin aikaa. Näitä tähtiä, joita kutsutaan myöskin oman prototyypitähdensä mukaisesti FK Com -tähdiksi³, tunnetaan vain kourallinen, koska tämäntyyppiset törmäykset ovat harvinaisia, ja lisäksi pyörimisen nopeutuminen on vain ohimenevä vaihe tähden elämässä – anna mennä joitain vuosimiljoonia, niin eiköhän pyöriminen hidastu takaisin ”normaalille” tasolle.

Johtui tähden pyöriminen sitten nuoresta iästä, jolloin pyöriminen ei yksinkertaisesti ole vielä ehtinyt hidastua, tai jostain muusta tekijästä, vaikuttavat tähtien magneettiset ominaisuudet melkoisen samanlaisilta, kunhan pyörimistä vain riittää. Yksi iso kysymys onkin, toimiiko todella samanlainen dynamo näiden kaikkien erilaisten tähtien sisuksissa?

²Tämän luokan prototyypitähti, RS CVn, on Ajokoirien tähtikuvion (Canes Venatici) tähti nimeltä RS. Selkeää, eikö?

³Taas nähdään, että kyseessä on Bereniken hiusten tähtikuvion FK-tähti, eli FK Comae Berenices.

Aivan samanlainen dynamo tuskin synnyttää magneettikenttiä kaikista aktiivisimmissa, hyvin nopeasti pyörivissä tähdissä. Nämä tähdet pyörähtävät itsensä ympäri noin vuorokaudessa, siinä missä Auringolta kuluu vastaavaan kierrokseen kuukausi. Nopeasti pyörivissä tähdissä ei nimittäin pitäisi esiintyä voimakasta differentiaalirotaatiota – niiden uskotaan pyörivän kuten kiinteä pallo pyörisi, joka osa samaa vauhtia.⁴ Tämän takia niissä ei esiintyne Auringon kaltaista dynamoa, sillä se vaatii toimiakseen voimakkaan differentiaalirotaation. Sen sijaan tietokonesimulaatioiden perusteella saman tyyppinen dynamo voisi toimia ilmankin tätä, jolloin turbulenssia aiheuttavien konvektiovirtausten rooli voimistuu, ja nämä ylösalas kulkevat virtaukset muuntavat yksinään magneettikentän muotoa syklin edetessä. MITEN TÄÄ TOIMII?

MITÄ JOS EI OLISI DIFF ROTAATIOTA EIKÄ KONVEKTIOTA? MILLAINEN MAGNEETTIKENTTÄ SYNTYISI? SILTIHÄN OLISI LIIKKUVIA VARAUKSIA...

Aurinkoa pienemmät tähdet, niin sanotut punaiset kääpiötähdet, ovat magneettisilta ominaisuuksiltaan mielenkiintoisia. Nämä tähdet, joita on ylivoimainen enemmistö maailmankaikkeuden tähdistä, ovat tyyppillisesti hyvin aktiivisia. Elämää ulkoavaruudesta etsivät astrobiologit ovat pitkään tähyilleet kääpiötähtiä kiertäville planeetoille – tässä on tiettyjä etuja, kuten se, että nämä tähdet elävät kaikista pisimpään, jopa satoja miljardeja vuosia⁵, eli tällaisella planeetalla elämällä olisi hyvin aikaa kehittyä. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että valtaosa näistä tähdistä ei tarjoa kovin otollisia elinolosuhteita kiertolaistensa pinnoille. Tämä johtuu ennen kaikkea näiden tähtien suurista roihupurkauksista, jotka ovat huomattavasti Auringon vastaavia voimakkaampia. Maapallon ilmakehä ja magneettikenttä suojelevat meitä Auringon roihuilta ja koronan massapurkauksilta, mutta pienemmän tähden ympärillä meidän kaltaiselle elämälle otolliset lämpötilan löytyvät paljon lähemmältä tähden pintaa, missä myös magneettisten purkausten voimakkuus on paljon suurempi. Tämä jatkuva korkean energian säteily ja hiukkasten pommitus saattaa siis olla omiaan sterilisoidaan punaisten kääpiötähtien planeettoja, joten nykyään astrobiologit eivät pidä näitä kaikista otollisimpina paikkoina maapallon ulkopuolisen elämän etsinnälle. Harmi sinänsä, koska Aurinkokuntaa lähimmältä tähdeltä, punaiselta kääpiöltä nimeltään Proxima Centauri, on löydetty useampia planeettoja ”elämänvyöhykkeeltä”, eli sellaiselta etäisyydeltä tähteen, missä lämpötila olisi tuntemallemme elämälle sopivaa. (CHECK)

Suurikokoisilla tähdillä – joiden massa on noin X kertaa Aurinkoa suurempi – tähde niin sanottu konvektiivinen kerros, missä plasmaa virtaa ylös ja alas, sijaitsee syvällä tähden sisällä. Tämä kerros on oleellinen magneettikentän synnyn kannalta – magneettikentän syntyhän vaatii plasman liikettä. Koska tämä kerros sijaitsee isoilla tähdillä syvällä pinnan alla, ei näiltä tähdillä odotettu löytyvän voimakkaita magneettikenttiä, sillä niiden pitäisi jäädä syvälle tähden sisuk-

⁴Tästä on tosin esitetty ristiriitaisia tuloksia. Yksi itsekkin tutkimistani nopeasti pyörivistä tähdistä, nimeltään V889 Her, vaikuttaa joidenkin tutkimusten mukaan pyörivän hyvinkin differentiaalisesti.

⁵Eli huomattavasti pitempään kuin maailmankaikkeuden tämänhetkinen elinikä, alle 14 miljardia vuotta.

siin, mistä moisen löytäminen olisi meille mahdotonta. Kuitenkin noin yhdellä kymmenestä (?) tällaisesta suurista, sinisistä⁶ tähdistä löytyykin kohtalaisen voimakas magneettikenttä. Näiden kenttien synty on edelleen pienoinen mysteeri. Ne vaikuttavat pysyvän vakaampina kuin pienempien tähtien magneettikentät, eli niillä ei ole samanlaista magneettista sykliä kuin Auringolla. Tämä saattaa kieliä siitä, että nämä mysteerikentät eivät muodostu aktiivisen dynamon kautta – jos näillä tähdillä onkin toimiva dynamo, jää niiden synnyttämä magneettikenttä syvälle tähden sisään, meidän havaitsemattomiin. Sen sijaan nämä kentät saattavat olla niin sanottuja fossiilikenttiä tai jäännelikenttiä, eli muisto tähden muodostumisen yhteydessä syntyneestä magneettikentästä, joka taas olisi peräisin siitä alkuperäisestä kaasupilvestä, josta tähti puristui kasaan. Samalla muinaisen kaasupilven magneettikenttä olisi tiivistynyt kasaan syntyneeseen tähteen, eikä se olisi vielä ehtinyt haihtua pois. Koska nämä suuret tähdet elävät lyhyemmän aikaa kuin pienemmät, Auringon kokoiset tähdet⁷, ei moinen jäännelikenttä kenties ehtisi tähden elinkaaren aikana kokonaan kadota. Toinen kannatusta saanut teoria esittää, että nämä magneettiset siniset tähdet olisivat saaneet magneettikenttensä kaksoistähden parivaljakon törmätessä toisiinsa, samoin kuin aiemmin mainitut FK Com -tyyppiset tähdet. Massiiviset tähdet syntyvät lähes aina kahden tai useamman tähden joukoissa, joten nämä törmäykset eivät välttämättä ole niin harvinaisia. Itse asiassa eräiden tutkimusten mukaan noin joka kymmenes suurten tähtien kaksoistähtijärjestelmä kokee tällaisen törmäyksen – koska tämä osuus sopii hyvin yhteen joka kymmenenneltä massiiviselta tähdeltä löytyneen yllättävän voimakkaan magneettikentän kanssa, on tätä pidetty lupaavana selityksenä. Varmuutta näiden magneettikenttien alkuperästä ei kuitenkaan vielä ole.

⁶Suurimmat tähdet ovat väriltään sinisiä, koska niiden tuottama valtava energiamäärä kuumentaa tähden pinnan hyvin kuumaksi. Fysiikan mukaan mitä kuumempi kappale on, sitä sinisempänä se säteilee.

⁷Suurimmat tähdet elävät ”vain” joitain miljoonia vuosia.

Luku 12

Neutronitähdet ja magnetarit – maailmankaikkeuden voimakkaimmat magneettikentät

Aurinkoa huomattavasti isommat tähdet – massaltaan vähintään noin 8 kertaa Auringon kokoiset – päättävät päivänsä suunnattomissa¹ supernovaräjähdyksissä. Tähdessä riippuen, saattaa sen ytimeistä jäädä räjähdysen jälkeen jäljelle joko neutronitähti tai musta aukko.

Neutronitähdet ovat magnetismin kannalta mielenkiintoisia. Ihan jo sen takia, että voimakkaimmat tunnetut magneettikentät löytyvät neutronitähdistä. Ai mitenkä voimakkaat? Voimakkain mitattu magneettikenttä löytyy neutronitähdestä nimeltään SGR 1806-20. Tämän ennätyksenhaltijan pinnalta löytyvän magneettikentän voimakkuuden arvioidaan olevan yli sata miljardia teslaa. Vertailun vuoksi, laboratorioissa saavutettu ennätysmagneettikenttä on pari tuhatta teslaa. Neutronitähdet siis peittoavat ihmisen noin kertoimella sata miljoonaa. Jonkun käsityksen tästä sadan miljardin teslan magneettikentästä voi saada ajatteleamalla, että vietäisi tuo SGR 1806-20 Kuuhun. Kuun etäisyydellä Maasta, pystyisi moinen magneettikenttä pyyhkimään tiedot kaikilta luottokorteilta Maan päältä. Ei hullummin magneettiselta kappaleelta, joka ei kuitenkaan ole kooltaan tuskin pientä kaupunkia isompi.

¹Tähtitieteessä termejä ”suunnaton”, ”valtava”, ”jättiläismäinen” yms. käytetään tiuhaan. Välillä se kuulostaa aikamoiselta toistolta, mutta sitten taas, mihinkään maanpäälliseen verrattuna tähtitieteelliset ilmiöt todella yleensä ovat hirvittävän suunnattomia, valtavia ja jättiläismäisiä. Nämä termit eivät edes tee niille oikeutta, sillä mikään adjektiivi tai superlatiivi tuskin pystyy todella antamaan käsitystä siitä, millaisia voimia supernova todella sisältää.

Neutronitähtien magneettikentät kasvavat näin huimiin lukemiin, koska tähden räjähtäessä sen ydin luhistuu kasaan. Siis todellakin kasaan, käsittämättömän tiiviiksi, ja siis samalla hyvin pieneksi. Aurinkoa suuremman tähden massa on tiivistynyt säteeltään noin kymmenen kilometrin kokoiseksi palloksi. Samalla myös tähden magneettikenttä säilyy – mutta sekin tiivistyy samalla isäntäkappaleensa mukana. Aurinko on säteeltään vajaat 700 000 kilometriä – ja supernovana räjähtävä jättiläistähti tätäkin isompi – ja tämä siis verrattuna kymmeneen kilometriin. Jos sama magneettikenttä puristetaan siinä mukana, niin ei ihme että teslamittari pomppaa korkealle.

Kaikista magneettisimpia neutronitähtiä nimitetään magnetareiksi.

<https://www.eso.org/public/news/eso2313/>

Luku 13

Magneettikentät kertymäkiekoissa

Luku 14

Galaktiset jättiläismagneettikentät

Yksittäisten tähtien, planeettojen, neutronitähtien ja mustien aukkojen lisäksi näitä kaikkia sisältävillä galakseillakin on omat magneettikenttensä. Auringon magneettikenttä saattaa tuntua suurelta, yltäähän se kauas Maan ja muiden planeettojen ratojen tuolle puolen, mutta kosmisessa mittakaavassa se on vain pieni kupla, joka nopeasti sulautuu yhteen koko Linnunradan kattavaan jättiläismagneettikenttään. Muillakin galakseilla on omat vastaavansa, ja galaksien välissäkin kulkee galaksienvälisiä magneettikenttiä. Suunnattomasta koostaan huolimatta – tai tavallaan juuri sen takia – nämä jättiläismagneettikentät ovat kuitenkin voimakkuudeltaan hyvin heikkoja. Maan päällä Linnunradan galaktinen magneettikenttä hukkuu kooltaan pienempiin, mutta paljon voimakkaampiin Maan sekä Auringon magneettikenttiin. Linnunradan magneettikentän voimakkuus on keskimäärin alle yksi nanotesla, eli alle kymmenestuhannesosa Maan magneettikentästä.

Galaksien mittakaavoissa nämä magneettikenttien jättiläiset ovat kuitenkin merkittäviä. Ne ohjailevat sähköisesti varatun aineen liikkeitä halki galaksin. Tämän takia esimerkiksi lähellä valonnopeutta liikkuvat varatut hiukkaset, niin sanotut kosmiset säteet, seurailevat avaruudessa liikkeessaan galaktisten magneettikenttien rakennetta. Tämä on oleellinen ero verrattuna valoon, joka kulkee suoraan eteenpäin, magneettikentistä välittämättä – valon välittäjähiukkasella, fotonilla, ei nimittäin ole sähkövarausta. Tämän takia kosmisten säteiden alkuperää on hyvin vaikea päätellä. Suurin osa niistä on peräisin kaukaisista supernovaräjähdyksistä, mutta on mahdotonta sanoa mistä yksittäinen hiukkanen on tullut, kun se on matkallaan poukkoillut ympäri galaktisia jättiläismagneettikenttiä. Nämä hiukkaset pommittavat meitä jatkuvana vuona¹, samoin kuin fotonitkin, mutta ilman tarkkaa tietoa siitä mistä ne ovat peräisin, kuin tv-kanavien välistä löytyvä lumisade – kiitos Linnunradan, Auringon ja Maan magneettikenttien.

¹Kaikista korkeaenergisimmiltä eli elämälle vaarallisimmilta kosmisilta säteilä meitä suojelee – onneksi – Maan magneettikenttä.



Kuva 14.1: Spiraaligalaksin M51 magneettikenttä noudattelee jossain määrin galaksin spiraalihaarojen muotoja. Kuva: NASA, ESA, Hubble, SOFIA.

Tähtien ja planeettojen tavoin myös galakseilla vaikuttaisi olevan magneettikenttiä synnyttäviä dynamoja. Etenkin supernovaräjähdykset aiheuttavat turbulenssia, joka liikuttelee tähtienvälisen kaasun sähköisesti varattuja hiukkasia, mikä aikaansaa magneettikentän. Galaksitkin pyörivät, jolloin paikallisten supernovaräjähdysten synnyttämät magneettikentät venyvät vuosimiljoonien aikana, mukaillen galaksin pyörimisliikettä, ja järjestäytyvät näin ympäri galaksia.

Luku 15

Kosmologiset magneettikentät?

Luku 16

Epilogi?