

Maailmankaikkeuden magneettikentät

Oletko huomionnut magneettikentät? Tämä kysymys on saanut monta tähtitieteilijää repimään hiuksiaan esitelmänsä päätteeksi, kun se on heille esitetty. Magneettikentät, joiden hahmottaminen on monille haastavaa, tuottavat vaikeuksia ammattitutkijoillekin. Useissa tutkimuksissa ne jätetään asioiden yksinkertaistamiseksi huomiotta, vaikka monesti niiden vaikutus on merkittävä. Jos siis koet, että magneettikentät tuntuvat haastavalta aiheelta, älä huoli – et ole ainoa!

Magneettikenttiä löytyy kaikkialta. Arkielämässä niihin kuitenkin kiinnittää harvoin huomiota, vaikka olemmekin niistä täysin riippuvaisia. Sähkö on meille usein magnetismia tutumpaa, vaikka nämä kaksi hyvin erillisiltä vaikuttavaa ilmiötä ovatkin saman voiman, *sähkömagneettisen vuorovaikutuksen*, kaksi eri ilmenemismuotoa. Arkielämässä magnetismi tuo monille mieleen lähinnä jääkaappien oviin kiinnitettävät pikkumagneetit, mutta todellisuudessa kaikkialla, missä virtaa sähköä, on myös magneettikenttiä – eli nykyaikaisessa kodissa lähes joka puolella. Lävitsemme kulkee myös maapallon magneettikenttä, jonka ansiosta kompassi osoittaa pohjoiseen. Tätäkin isommassa mittakaavassa sulaudumme osaksi Auringon magneettikenttää, jota aurinkotuuli kantaa mukanaan, ja se taas yhtyy lopulta kotigalaksimme Linnunradan valtavaan magneettikenttään. Jopa kaikki näkemämme valo kantaa mukanaan magneettikenttää: näkyvä valo sekä muu sähkömagneettinen säteily on nimittäin pohjimmiltaan aaltoliikettä, jossa sähkö- ja magneettikentät etenevät tasaisena aaltona valonnopeudella välittäjähiukkastensa fotonien kantamana.

Miten magneettikentät, aina atomitasolta galakseja suurempiin mittakaavoihin, sitten syntyvät? Periaatteessa magneettikentän muodostuminen on yksinkertaista: magneettikenttä syntyy aina sinne, missä on liikkuvia sähkövarauksia. Esimerkiksi sähköjohdoissamme kulkeva sähkö on varattujen elektronien liikettä, ja siksi sähkölaitteet synnyttävät aina myös jonkinlaisen magneettikentän.

Tyypillisesti maailmankaikkeuden suuria magneettikenttiä ylläpitävät niin sanotut dynamot. Dynamoksi kutsutaan prosessia, jossa aineen liike-energiaa muuttuu sähkömagneettiseksi energiaksi. Arjesta tuttu esimerkki on polkupyörän dynamo, joka tuottaa lampulle sähkövirtaa pyörän liikkeestä. Dynamon sisällä on magneetti, jota pyörän polkeminen liikuttaa, jolloin liikkeessä oleva magneettikenttä aikaansaa sähkövirran. Sähkövirta ja magneettikenttä siis synnyttävät toisiaan. Ilmiö toimii kumpaan suuntaan: sähkövirta muodostaa magneettikentän, ja toisaalta muuttuva magneettikenttä

synnyttää sähköä. Sama periaate ylläpitää suunnattomia magneettikenttiä niin planeetoissa, tähdissä kuin galakseissakin. Ilman suunnattomia sähkövirtoja näitäkään magneettikenttiä ei siis voisi olla olemassa.

Atomeista arkimaailmaan

Jos magnetismi vaatii sähkövirtaa, niin miten tavallinen jääkaappimagneetti sitten aikaansaa magneettikenttäänsä? Vastaus piilee aineen pienissä rakennuspalikoissa, atomeissa, ja erityisesti atomien sisältämissä 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. Elektronilla on negatiivinen sähkövaraus, jolloin sen liike vastaa sähkövirtaa, josta taas 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. Elektronin spin kuitenkin synnyttää hiukkaselle myös magneettikentän. Valtaosassa atomeja elektronit spineineen ovat järjestäytyneet siten, että niiden pikkuruiset magneettikentät kumoavat toisensa. Muutamissa alkuaineissa – tunnetuimpina rauta, 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. Tällaisia aineita nimitetään *ferromagneettisiksi*. Arkielämän magneetit valmistetaan näistä aineista.

Magneettikentän voimakkuutta mitataan tesloina – vaihtovirran kehittäneen fyysikko Nikola Teslan nimi on päätenyt sähköautojen lisäksi myös magneettisen vuontiheyden yksiköksi. Tyypillisen jääkaappimagneetin magneettikentän voimakkuus on muutamia millitesloja, eli noin sata kertaa voimakkaampi kuin Maan magneettikenttä. Koska nämä hyvin paikalliset, pienten kappaleiden synnyttämät magneettikentät peittoavat lähistöllään koko planeetan magneettikentän, johtaa tämä siihen, että kompassi sekoaa suunnastaan, jos sen asettaa lähelle magneettista kappaletta.

Voimakkaimmat laboratorioissa luodut magneettikentät yltyvät jo tuhansiin tesloihin, eli ne ovat noin miljoona kertaa tavallisia jääkaappimagneetteja voimakkaampia. Näin äärimmäiset kentät peittoavat jo valtaosan luonnollisista

magneettikentistä, joskin kaikkein äärimmäisissä taivaankappaleissa magneettikenttien voimakkuus kasvaa vielä paljon tätäkin suurempiin lukemiin.

Magneettiset planeetat

Tunnetuin tähtitieteellinen magneettikenttä lienee omalla maapallollamme. Se kulkee magneettisten napojen välillä, jotka ovat hiukan vinossa suhteessa maantieteellisiin napohin. Tämän takia kompassi ei osoita täsmälleen pohjoiseen.

Maan magneettikenttä syntyy dynamoprosessissa Maan ytimen sulassa ulko-osassa. Nestemäinen rauta ja nikkeli johtavat hyvin sähköä, joten niiden virtaukset ulkoytimessä synnyttävät myös magneettikentän. Vaikka rauta ja nikkeli, joista planeettamme ydin pääasiassa koostuu, ovat ferromagneettisia aineita, häviävät niiden magneettiset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa, jotka syvällä planeetan sisällä vallitsevat. Näin ollen Maan magneettikentän synnyttämiseen vaaditaan ytimen sähkövirtauksien ajama dynamo. Elävien olentojen kannalta Maan magneettikenttä on elintärkeä, sillä se suojelee meitä korkea-energiseltä kosmiselta säteilyltä, joka ei magneettikentän ansiosta pääse maan pinnalle.

Myös muilla planeetoilla on omia magneettikenttiään. Jupiterilla suurimpana planeettana on myös voimakkain magneettikenttä, kymmenisen kertaa voimakkaampi kuin Maalla. Kaasujättiläiset ovat rakenteeltaan erilaisia kuin aurinkokunnan sisäosien kiviplaneetat. Siksi niiden magneettikentätkin muodostuvat hieman eri tavoin. Jupiterin magneettikenttä saa alkunsa planeetan ydintä ympäröivästä niin sanotun metallisen vedyn kerroksesta. Valtavassa paineessa syvällä planeetan sisällä nestemäinen vety käyttäytyy metallin tavoin, jolloin vetyatomien elektronit liikkuvat vapaasti atomien välillä. Tässä olomuodossa vety johtaa hyvin sähköä, mikä mahdollistaa näin magneettikentän aikaan saavat sähkövirtaukset.

Dynamon kautta syntyvät planeetan kokoiset magneettikentät vaativat sulan ytimen, jossa sähköisesti varautunut aine pääsee virtaamaan. Sen takia pienillä, läpeensä kiinteillä kappaleilla ei voimakkaita magneettikenttiä löydy. Myös riittävän nopea pyöriminen on oleellista. Esimerkiksi Venus pyörii liian hitaasti, yhden pyörähdyksen akselinsa ympäri noin 243 vuorokaudessa, jolloin planeetan ytimeen ei synny vaadittavia virtauksia ylläpitämään dynamoa. Näin ollen naapuriplaneetallamme ei ole merkittävää magneettikenttää. Toisellakaan naapuriplaneetallamme, Marsilla, ei ole magneettikenttää ylläpitävää dynamoa, mutta sekä Venuksella että Marsilla on saattanut joskus sellaiset olla.

Magneettikenttiä löytynee myös aurinkokunnan ulkopuolisilta eksoplaneetoilta, mutta niiden havaitseminen on äärimmäisen vaikeaa.

Tähdistä mustiin aukkoihin

Planeettoja huomattavasti voimakkaampia magneettikenttiä syntyy tähdissä. Tähdet, kuten valtaosa maailmankaikkeuden tunnetusta aineesta, koostuvat lähes kokonaan vedystä ja heliumista. Planeetat, joilla raudan kaltaiset ferromagneettiset aineet saattavat muodostaa omia pieniä magneettikenttiään, ovat kosmisessa mittakaavassa vain pieni poikkeus. Tähdissä sen sijaan lämpötila on riittävän korkea, jotta vety ja helium *ionisoituvat*. Tällöin atomit menettävät elektroneitaan, jolloin ainetta kutsutaan *plasmaksi*. Plasma koostuu positiivisista atomiytimistä sekä negatiivisista, vapaasti liikkuvista elektroneista. Siten plasma on sähköisesti varautunut, mikä johtaa siihen, että plasman liikkuaessa se synnyttää samalla magneettikentän.

Lähitähtemme Aurinko pyörähtää kierroksen itsensä ympäri noin kuukaudessa. Tämä liike riittää mainiosti ylläpitämään dynamo, joka synnyttää joidenkin satojen mikrotreslojen vahvuisen magneettikentän. Kenttä muuttuu jatkuvasti monimutkaisissa prosesseissa, joita ylläpitävät Auringon pyörimisen lisäksi tähden ytimessä tapahtuvien fuusioreaktioiden nostattamat plasmavirtaukset, joissa ytimessä syntyvä energia virtaa kohti pintaa. Nämä plasman liikkeet muuttavat jatkuvasti magneettikenttää vaikeasti ennustettavilla tavoilla. Välillä kenttään muodostuu tiheitä silmukoita, joihin syntyy Auringon tarkkailijoille tuttuja auringonpilkkuja, sekä erilaisia magneettisia purkauksia, kuten roihuja ja koronan massapurkauksia. Näistä jälkimmäiset aikaansaavat toisinaan näyttäviä revontulia, kun Auringosta lähtevät varatut hiukkaset osuvat Maan yläilmakehän molekyyleihin, jotka taas säteilevät saamansa energian Maan pinnalle havaittavana valona. Juuri magneettikentän pienten rakenteiden vaikean ennustettavuuden takia revontulienkaan esiintymistä ei pystytä ennustamaan kuin muutaman päivän päähän. Auringonpilkuissa magneettikenttä tihentyy huomattavasti ympäristöään voimakkaammaksi, jo lähelle yhden teslan voimakkuutta.

Nuorissa tähdissä, jotka pyörivät Aurinkoa nopeammin, ovat myös magneettikentät, sekä niistä syntyvät ilmiöt, paljon voimakkaampia. Tällaisia tähtiä saattavat peittää valtavat, lähes koko tähden kokoiset tähdenpilkut. Tähdistä lähtevät purkaukset ovat niin voimakkaita, että tällaisia tähtiä kiertävillä planeetoilla elämän kehittyminen on luultavasti haastavaa, vaikka planeetat muuten luokiteltaisiinkin elinkelpoisiksi.

Voimakkaimmat mitatut magneettikentät löytyvät erittäin magneettisista neutronitähdistä, *magnetareista*. Nämä ovat supernovaräjähdyksissä tuhoutuneiden tähtien jäänteitä, tavattoman tiiviitä kappaleita, joissa tähden alkuperäinen magneettikenttä on tiivistynyt suunnattomiin voimakkuuksiin. Ennätystä voimakkaimmasta havaitusta magneettikentästä pitää hallussaan SGR 1806-20, jonka magneettikentän voimakkuuden arvoidaan olevan yli sata miljardia teslaa.

Magneettikenttiä löytyy myös neutronitähtiäkin tiheämpien kappaleiden, mustien aukkojen, ympäristöistä. Mustien aukkojen kertymäkiekoissa magneettikentät mutkistavat aineen liikkeitä, ja saattavat edesauttaa ainesta putoamaan sisään aukkoon, saaden näin putoavan aineen kuumenemaan ja säteilemään kirkkaasti. Toisaalta myös useiden aktiivisten galaksien keskustoista lähtevät suunnattomat ainesuihkut ovat luultavasti supermassiivista mustaa aukkoa ympäröivien magneettikenttien laukaisemia. Siten magneettikenttien vaikutus mustaa aukkoa ympäröivään aineeseen ei ole täysin yksinkertaista, sillä ne saattavat sekä ohjata ainetta sisään aukkoon että singota sitä matkoihinsa.

Mitään näistä kaukaisista magneettikentistä emme voi tietenkään suoraan mitata, mutta onneksi magneettikentät vaikuttavat hiukkasiin, joista näistä kohteista näkemämme valo on peräisin. Nämä vaikutukset tunnetaan, jolloin valon ominaisuuksia tutkimalla voidaan päätellä myös asioita kohteen magneettikentästä. Esimerkiksi valon polarisaatio, eli suunta missä valoallon sähkö- ja magneettikenttä värähtelevät, sekä tietyissä spektriviivoissa tapahtuvat muutokset, kielivät magneettikentän läsnäolosta.

Galaktiset jättiläiskentät

Auringon magneettikenttä yltää kauas planeettojen ratojen tuolle puolen, mutta kosmisessa mittakaavassa se on vain pieni kupla, joka pian sulautuu osaksi Linnunradan magneettikenttää. Linnunradalla ja muilla galakseilla on omia, galaktisia magneettikenttiään, joiden välillä kulkee jopa galaksienvälisiäkin kosmisia magneettikenttiä. Valtavasta koostaan huolimatta nämä magneettikentät ovat kuitenkin voimakkuudeltaan hyvin heikkoja. Maan päällä ne hukkuvat kooltaan pienempiin, mutta voimakkaampiin Auringon sekä Maan magneettikenttiin. Linnunradan magneettikentän voimakkuus on keskimäärin alle yksi nanotesla, eli alle kymmenestuhannesosa Maan magneettikentän voimakkuudesta.

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 liikkueensa 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.

Tähtien ja planeettojen tavoin myös galaksien magneettikenttiä ylläpitävät luultavasti dynamot. Esimerkiksi supernovaräjähdykset aiheuttavat turbulenssia, joka liikuttaa tähtienvälisen kaasun ionisoituneita hiukkasia, aikaansaaden näin magneettikentän. Galaksitkin pyörivät, jolloin paikallisten supernovaräjähdysten synnyttämät magneettikentät venyvät vuosimiljoonien aikana, mukaillen galaksin pyörimisliikettä, ja järjestäytyvät näin ympäri galaksia. Näin siis samankaltaiset mekanismit ovat vastuussa niin polkupyörän lampun vaatimasta sähkövirrasta, kuin valtavista, galaksien laajuisista jättiläismagneettikentistäkin.

Yksi asia lienee siis selvää: vaikka magneettikentät eivät tuntuisi tavallisessa arkielämässä erityisen merkityksellisiltä, ovat ne silti perustavanlaatuisen tärkeä osa maailmankaikkeutta.

Taulukko eri kohteiden magneettikenttien voimakkuuksista:

Linnunrata	< nanotesla
Maa	kymmeniä mikrottesloja
Jupiter	satoja mikrottesloja
Aurinko	satoja mikrottesloja
jääkaappimagneetti	muutama millitesla
auringonpilkut	satoja millitesloja
voimakkaimmat labrat	tuhansia tesloja
voimakkain magnetari	> 100 miljardia teslaa



M51 galaksin magneettikenttä NASAn SOFIA-observatorion kuvantamana.