



Kandidaatintutkielma

ELF-VLF-aallot geofysiikan tutkimuskohteena

Iina Sirviö
2014

Ohjaajat: Jyrki Manninen (SGO)
Arto Javanainen (JYU)
Tarkastaja:

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIIKAN LAITOS

PL 35 (YFL)
40014 Jyväskylän yliopisto

Tiivistelmä

Tämä tutkielma liittyy Sodankylän geofysiikan observatorion ELF-VLF-tutkimusryhmän, etenkin dos. Jyrki Mannisen tutkimuksiin. Tutkielma on toteutettu vuosina 2013 ja 2014 SGO:lla suorittamieni harjoitteluiden yhteydessä, erityisesti liittyen joulu-tammikuussa 2013–2014 toteutettuun ELF-VLF-mittauskampanjaan. Pysin esittelemään tutkielmassa lyhyesti kampanjan tutkimuskohteita ja jotain mielenkiintoisimpia tuloksia. Sodankylässä tehtävä ELF-VLF-tutkimus on maailmanlaajuisesti tunnustettua ja koejärjestelyä siellä pidetään alan parhaana. Sen takia on ollut äärimmäisen mielenkiintoista tutustua alaan, tutkimusmenetelmiin ja havaintoihin juuri Sodankylässä.

Harjoitteluni aikana Sodankylässä otettiin käyttöön pitkän työn tuloksena kehitetty mittausdatan analysointimenetelmä, joka poistaa ELF-VLF-ilmiöitä tutkittaessa häiritsevät taustasignaalit erittäin hyvin. Analysointimenetelmän käyttöönoton myötä huomattiin, että häiriöiden täyttämät ”pimeät” taajuudet ovat täynnä erikoisen korkeataajuisia ELF-VLF-ilmiöitä, joiden olemassaolosta ei aikaisemmin tiedetty. Jotta näitä ilmiöitä voitaisi ymmärtää, vaaditaan perusteellista teoreettista paneutumista, ja mittavaa kokeellista tutkimusta. Työ aiheen parissa tulee osaltani jatkumaan Pro Gradu-tutkielman yhteydessä.

Sisältö

Tiivistelmä	iii
1 Johdanto	1
1.1 Matalan taajuuden sähkömagneettiset signaalit	1
1.2 ELF-VLF eri näkökulmista	2
1.3 Historiaa	3
1.4 Vihellykset	4
1.4.1 Vihellyksen eteneminen	6
1.4.2 Vihellystyypit	8
1.5 Emissiot	10
2 Teoriaa	14
2.1 Magnetosfääri	14
2.2 Plasma	17
2.3 Aalto-hiukkasvuorovaikutus	19
2.4 Vihellysmoodi	20
3 Mittaukset Sodankylässä	22
3.1 ELF-VLF-tutkimus Sodankylässä	22
3.2 Tuloksia 2013c-mittauskampanjasta	25
3.3 Spekulointia	27
3.4 Tulevaisuuden suunnitelmia	29
4 Yhteenveto	31
Viitteet	32

1 Johdanto

1.1 Matalan taajuuden sähkömagneettiset signaalit

ELF-VLF-aallot ovat erittäin matalataajuisia radioaaltoja. Termi tulee englannin kielen sanoista *Extremely Low Frequency* ja *Very Low Frequency*. ELF-VLF-taajuus on virallisen määritelmän mukaan 3 Hz – 30 kHz [International Telecommunication Union, 2008]. ELF-VLF-ilmiöillä tarkoitetaan yleisesti kaikenlaisia signaaleja, joita havaitaan tällä taajuuskaistalla.

Geofysiikan julkaisuissa ELF-VLF-aaltoja kutsutaan usein VLF-aalloiksi. Tämä johtuu historiallisista syistä. Kun ELF-VLF-tutkimus syntyi 1950-luvulla, olivat VLF-taajuu-
det vielä matalimpia havaittavissa olevia taajuuksia. Kun laitteet myöhemmin kehittyivät, pystyttiin havaitsemaan vielä tätäkin matalampia taajuuksia, ja siksi tarvittiin uutta termistöä. Radiotaajuusstandardeja on muutettu useaan otteeseen tämän jälkeen, mikä on häirinnyt terminologian vakiintumista. Karkeasti voidaan sanoa, että viime vuositu-
hannella puhuttiin vielä VLF-aalloista, ja 2000-luvulla joko ELF-VLF- tai ELF/VLF-
aalloista. Intuitiivisesti kaikilla tarkoitetaan kuitenkin samaa geofysiikan tutkimusalaa.

Radiotaajuuksien terminologia on jokseenkin sekavaa määritelmien kvalitatiivisen luon-
teen takia. Tutkijat soveltavat määritelmiä julkaisuissaan sen mukaan, ovatko aallot juu-
ri hänen tutkimuksensa näkökulman kannalta *erittäin* vai *äärimmäisen* matalataajuisia. Radiotieteilijät ja geofyysikot käyttävät termistöä eri tavoin, ja kunkin alan sisällä vertai-
luasteittain sekaisin riippuen tutkimuksen näkökulmasta ja julkaisun ilmestymisajankoh-
dasta. Taulukossa 1 on esitetty radiotaajuuskaistojen tuorein virallinen määritelmä sekä
jaottelu, joka geofysiikan kansainvälinen tiedeyhteisö julkaisuissaan käyttää.

Lyhenne	Kastan nimi	Taajuus radiotieteissä	Taajuus geofysiikassa
ELF	Extremely Low Frequency	3 – 30 Hz	30 Hz – 3 kHz
SLF	Super Low Frequency	30 – 300 Hz	
ULF	Ultra Low Frequency	300 – 3000 Hz	< 30 Hz
VLF	Very Low Frequency	3 – 30 kHz	3 – 30 kHz
LF	Low Frequency	30 – 300 kHz	
MF	Medium Frequency	300 – 3000 kHz	
HF	High Frequency	3 – 30 MHz	
VHF	Very High Frequency	30 – 300 MHz	
UHF	Ultra High Frequency	300 – 3000 MHz	
SHF	Super High Frequency	3 – 30 GHz	
EHF	Extremely High Frequency	30 – 300 GHz	

Taulukko 1: Radioaaltojen taajuuskaistat

1.2 ELF-VLF eri näkökulmista

ELF-VLF-taajuusalueen aaltoja tutkitaan ainakin kolmella fysiikan alalla. Radiotieteissä keskitytään keinotekoisesti indusoitujen aaltojen tutkimiseen, ja etenkin niiden soveltamiseen tekniikassa. Geofysiikka taas tutkii maapallolla luonnostaan esiintyviä ELF-VLF-aaltoja, ja niiden käyttäytymistä maapallon fysikaalisessa ympäristössä. Avaruusfysiikassa tutkitaan maapallon ulkopuolisessa avaruudessa, kuten aurinkokuntamme muilla planeetoilla spontaanisti syntyviä ELF-VLF-aaltoja.

Keinotekoisilla ELF-VLF-aalloilla on useita hyödyllisiä sovelluksia, joista useimmat perustuvat VLF-taajuuksien hyvään läpäisykykyyn vedessä ja maassa. Yksi VLF-aaltoja hyödyntävä, kaikille tuttu laite on metallinpaljastin. Siinä VLF-aaltoja käytetään luomaan muuttuva magneettikenttä, joka indusoi johteisiin sähkövirtoja. Vastaanotetusta signaalista voidaan päätellä, sisältääkö maaperä metalia.

Eräs toinen hyödyllinen sovellus on sukellusveneiden radionavigointi. Siinä tunnettuun sijaintiin sijoitetaan lähetin, joka lähettää tietyn taajuisia radioaaltoja. Sukellusveneessä oleva vastaanotin vastaanottaa aallon, jonka signaalista voidaan päätellä, kuinka kaukana kyseisestä VLF-asemasta ollaan. VLF-taajuuksia käytetään myös maa-aseman ja veden alla olevan sukellusveneen väliseen kommunikointiin.

VLF-navigointiasemien signaaleja voidaan käyttää paitsi suunnistukseen, myös malminetsintään. Tässä on yhdistetty metallinpaljastintekniikkaa ja VLF-asemien signaaleja. Yleensä malminetsintä tapahtuu helikopterilla, josta on asetettu roikkumaan suuri silmukka-antenni (kuva 1). Malmit tunnustetaan samalla periaatteella kuin metallinpaljastimessa.



Kuva 1: Malminetsintää Sodankylän Kannuslehdossa VLF-tekniikalla keväällä 2011. (Kuva J. Manninen)

Joskus ihmisten luoma tekniikka synnyttää ELF-VLF-aaltoja tahattomasti. Näin tapahtuu esimerkiksi voimalinjoissa. Voimalinjat säteilevät jatkuvasti ELF-VLF-taajuudella, mikä häiritsee muualta peräisin olevien signaalien mittaamista. Lähimpään voimalinjaan täytyy olla etäisyyttä vähintään 10 km, jos sen säteilyn aiheuttamat häiriöt halutaan minimoida mittauksessa. Tämän vuoksi ELF-VLF-vastaanottimet sijaitsevat yleensä erämaassa. Voimalinjojen säteilyä on käsitelty mm. lähteissä [Yearby, 1982] ja [Manninen, 2005].

ELF-VLF-aaltoja syntyy myös luonnollisista lähteistä. Maanpinnalla luonnollisesti syntyvät ELF-VLF-aallot ovat peräisin salamaniskusta. Salaman iskiessä syntyy valon lisäksi laajakaistainen, VLF-taajuudet kattava radiopurske. Osa salamaniskussa syntyneistä radioaalloista läpäisee ionosfäärin rajapinnan ja pääsee etenemään magnetosfääriin. Tällaisia aaltoja kutsutaan *vihellyksiksi*.

ELF-VLF-aaltoja syntyy myös magnetosfäärissä esim. aurinkotuulen vaikutuksesta. Magnetosfäärissä syntyneitä ELF-VLF-aaltoja kutsutaan *ELF-VLF-emissioiksi*. Vihellykset ja emissiot ovat geofysiikassa ELF-VLF-tutkimuksen pääasialliset tutkimuskohteet, ja niihin paneudutaan myöhemmin tarkemmin.

Vaikka ELF-VLF-aalloista puhutaankin tässä tutkielmassa geofysikaalisesta näkökulmasta, ilmiö ei ole mikään maapallon oma erikoisuus. ELF-VLF-aaltoja on havaittu mm. Jupiterilla [Gurnett et al., 1979], Saturnuksella [Gurnett et al., 1981], Uranuksella [Gurnett et al., 1986], Neptunuksella [Gurnett et al., 1989] ja komeetta Halley'n pyrstössä [Grard et al., 1986]. Tarkasteltavassa järjestelmässä on oltava magneettikenttä ja ionosfääri, jotta ELF-VLF-aaltojen spontaani syntyminen on teoriassa mahdollista.

1.3 Historiaa

ELF-VLF-ilmiöitä havaitaan taajuuksilla 0,3 – 30 kHz [Kimura, 1967]. Ihmisen kuuloalue taas on noin 0,02 – 20 kHz, joten useimmat ELF-VLF-signaalit voidaan muuntaa radioaalloista ääneksi. Vihellykset ja emissiot ovat siis havaittavissa ihmiskorvalla hyvinkin yksinkertaisella radiovastaanottimella.

Ensimmäiset maininnat ELF-VLF-aalloista löytyvät jo 1800-luvun loppupuolelta, puhelimen keksimisen ajoilta. Tuolloin Preece [1894] kuvasi lennätinvirkailijoiden kuulleen puheluiden seasta outoja, viheltäviä ääniä. Eräs varhaisimmista luotettavista aiheita koskevista maininnoista tehtiin 1. maailmansodan tuoksinnassa, kun sotilaat yrittivät salakuunnella vastapuolen puheluita. Barkhausen [1919] kertoo, kuinka sotilaat kuulivat puhelulinjoilla ujeltavia ääniä ja luulivat kuulleensa granaattien lentävän. Sekä lennätinvirkailijoiden että sotilaiden kuulemat äänet olivat mitä todennäköisimmin vihellyksiä, luonnossa spontaanisti syntyviä ELF-VLF-ilmiöitä, jotka ovat saaneet nimensä vihellystä muistuttavasta äänestään.

Storey [1953] tutki vihellyksiä jo 1950-luvulla. Tämä tapahtui samoihin aikoihin, kun

Yhdysvalloissa alettiin ensikertaa puhua lentävistä lautasista. Vihellys-ilmiön erikoislaatuisuus ja Storeyn tutkimusten julkaisuajankohta olivat omiaan heikentämään avaruudesta tulevia ääniä tutkivan tiedemiehen uskottavuutta, ja niin Storeyn vihellyksistä kirjoittama väitöskirja hylättiin liian mielikuvituksellisena.

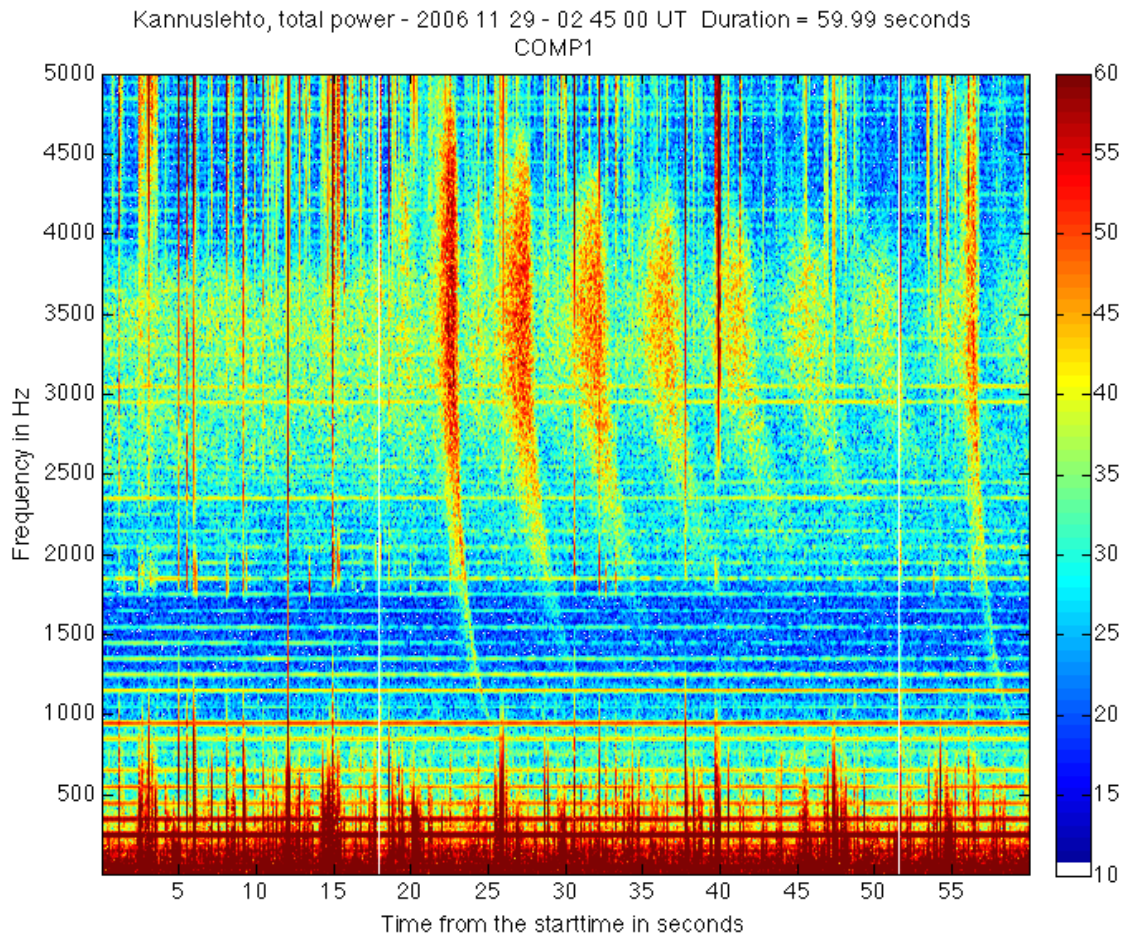
VLF-tutkimus alettiin ottaa tosissaan 1960-luvulla, kun *Helliwell* [1965] alkoi rekisteröidä ja luokitella VLF-ilmiöitä. Juuri Helliwelliä pidetään alan tärkeimpänä pioneerinä. Näihin aikoihin myös media kiinnostui ilmiöstä, ja vihellyksistä kirjoitettiin lehdissä mahtipontisesti ”ääninä ulkoavaruudesta” lentäviin lautasiiin viitaten. Kyseenalaisen mediahuomion seurauksena useat varteenotettavat tutkijat kuitenkin kiinnostuivat alasta. Suurin osa vihellyksiä käsittelevistä julkaisuista onkin kirjoitettu 60–70-luvulla.

ELF-VLF-tutkimus on 1960-lähtien ollut kokeellista havainnointia maanpinnalla olevilla mittausasemilla, ja teorioiden kehittämistä syntymekanismien ymmärtämiseksi. Merkittävää tutkimusta on tehty etenkin Yhdysvalloissa Stanfordin yliopistossa, jonka professorina itse Helliwell toimi. Havainnointia on tehty esimerkiksi Etelämantereella, jossa toimii useita ELF-VLF-mittalaitteita, tärkeimpinä mainittakoon British Antarctic Surveyn asema Halleyssä ja Stanfordin yliopiston asema Siplessä. Avaruusajan alettua myös satelliitteihin asennettiin ahkerasti ELF-VLF-mittauksia. ELF-VLF-aaltoja mitanneita satelliitteja ovat mm. OGO-satelliitit [mm. *Burtis and Helliwell*, 1969], Cluster [mm. *Gurnett et al.*, 2001], DEMETER [esim. *Piddyachiy et al.*, 2008] ja Voyager 1 [mm. *Gurnett et al.*, 1981].

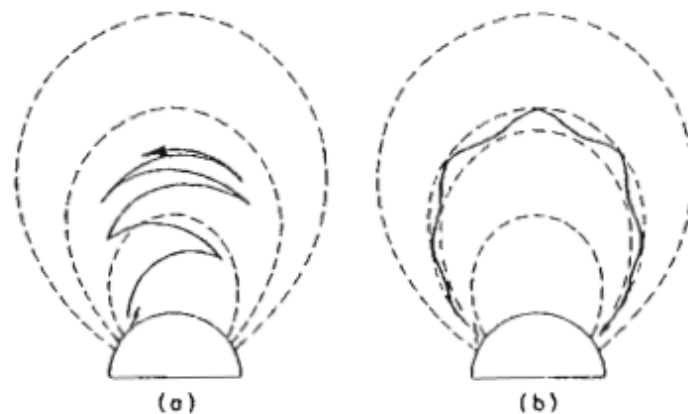
1.4 Vihellykset

Geofysiikassa ELF-VLF-tutkimuksen tärkeimpiä tutkimuskohteita ovat vihellykset ja emissiot. Näistä vihellykset ovat ilmiönä emissioita kauemmin tunnettu ja huomattavasti tutkitumpi. Vihellys on ELF-VLF-ilmiö, joka syntyy salamaniskusta [*Eckersley*, 1931]. Vihellyksiksi kutsutaan niitä salamaniskusta syntyneitä radioaaltoja, jotka pääsevät läpäisemään ionosfääriin. Ionosfääri sijaitsee n. 50 – 400 km korkeudessa maanpinnasta, ja sillä tarkoitetaan maapallon kaasukehän sähköjohtavaa osaa, jossa kaasumolekyylit ovat ionisoituneet.

Ionosfääriin läpäisseet vihellykset etenevät magnetosfääriin ja jäävät yleensä poukkoilemaan sinne, kunnes niiden energia kuluu loppuun. Tällaisia vihellyksiä kutsutaan *kanavoitumattomiksi* ja ne voidaan havaita satelliittimittauksissa. Joskus vihellys kuitenkin *kanavoituu*. Tällöin syntyy ketjureaktio, jonka seurauksena vihellys lopulta palaa magnetosfääristä maanpinnalle. Kanavoituneet vihellykset voidaan havaita maanpinnalla olevassa ELF-VLF-vastaanottimessa taustasta erottuvana radioaaltosignaalin ajallisena taajuuden ja intensiteetin muutoksena (kuva 2). Kanavoituneen ja kanavoitumattoman vihellyksen etenemisradat on esitetty kuvassa 3.



Kuva 2: Sodankylässä havaittu kaikusarjavihellys. Ajanhetkellä 02:45:18 UT nähdään vihellyksen aiheuttaneen salamaniskun signaali. Salamanisku näkyy spektrissä valkoisena pystyviivana, sillä salamanpoistologiikka on poistanut sen ”liian”voimakkaana. Ajanhetkellä 02:45:23 UT nähdään salamaniskun aiheuttama vihellys, ja sen jälkeen n. 4 s välein vihellyksen kaikuja. Tummanpunaiset pystyviivat kaistalla 2000 – 5000 Hz ovat ympäri maapalloa tapahtuneiden salamaniskujen signaaleja. Väriskaalan yksiköt ovat desibelejä.



Kuva 3: Kanavoitumattoman (a) ja kanavoituneen (b) vihellyksen etenemispolut. Katkoviivat ovat Maan magneettikentän kenttäviivoja [Park and Carpenter, 1978]

Salamaniskun synnyttämä radiopurske on lyhytkestoinen, laajakaistanen ja intensiteetiltään suuri. Radiopurskeen taajuudet ovat välillä 3 Hz – 30 kHz [Wood and Inan, 2002], mutta yleensä ELF-VLF-spektrissä salamaniskun signaali ei yllä alimmille kilohertseille asti. Ne salamasignaalit, jotka synnyttävät maanpinnalla havaittavan vihellyksen, etenevät magnetosfääriin ja kulkevat siellä tuhansien kilometrien matkan ennen saapumistaan vastaanottimeen. Matkan aikana signaalin taajuudet dispersoituvat. Tällöin yleensä matalammat taajuudet etenevät hitaammin, ja korkeammat nopeammin, jolloin vastaanottimeen saapuessaan signaalin muoto on taipunut kuten kuvassa 2. Tästä johtuu vihellyksille ominainen signaalimuoto ELF-VLF-spektrissä.

Jokainen salamanisku synnyttää vihellyksen, sillä ennemmin tai myöhemmin osa salamaniskun tuottamista radioaaltoista etenee ionosfääriin läpi magnetosfääriin. Salamaniskuja tapahtuu ympäri maapalloa keskimäärin 44 kpl joka sekunti [Christian et al., 2003], joten selvästikään kaikkia syntyneitä vihellyksiä ei vastaanottimissa havaita. Tämä johtuu siitä, että vain hyvin pieni osa syntyneistä vihellyksistä kanavoituu, ja palaa magnetosfääristä takaisin maanpinnalle. Kanavoituneita vihellyksiä ja niiden etenemisprosessia on tutkittu paljon, ja ne ovat tärkeä apu magnetosfäärin tutkimisessa. Yksi geofysiikan tärkeimmistä läpimurroista, plasmapausin löytäminen tehtiin vihellysten avulla [Carpenter, 1963].

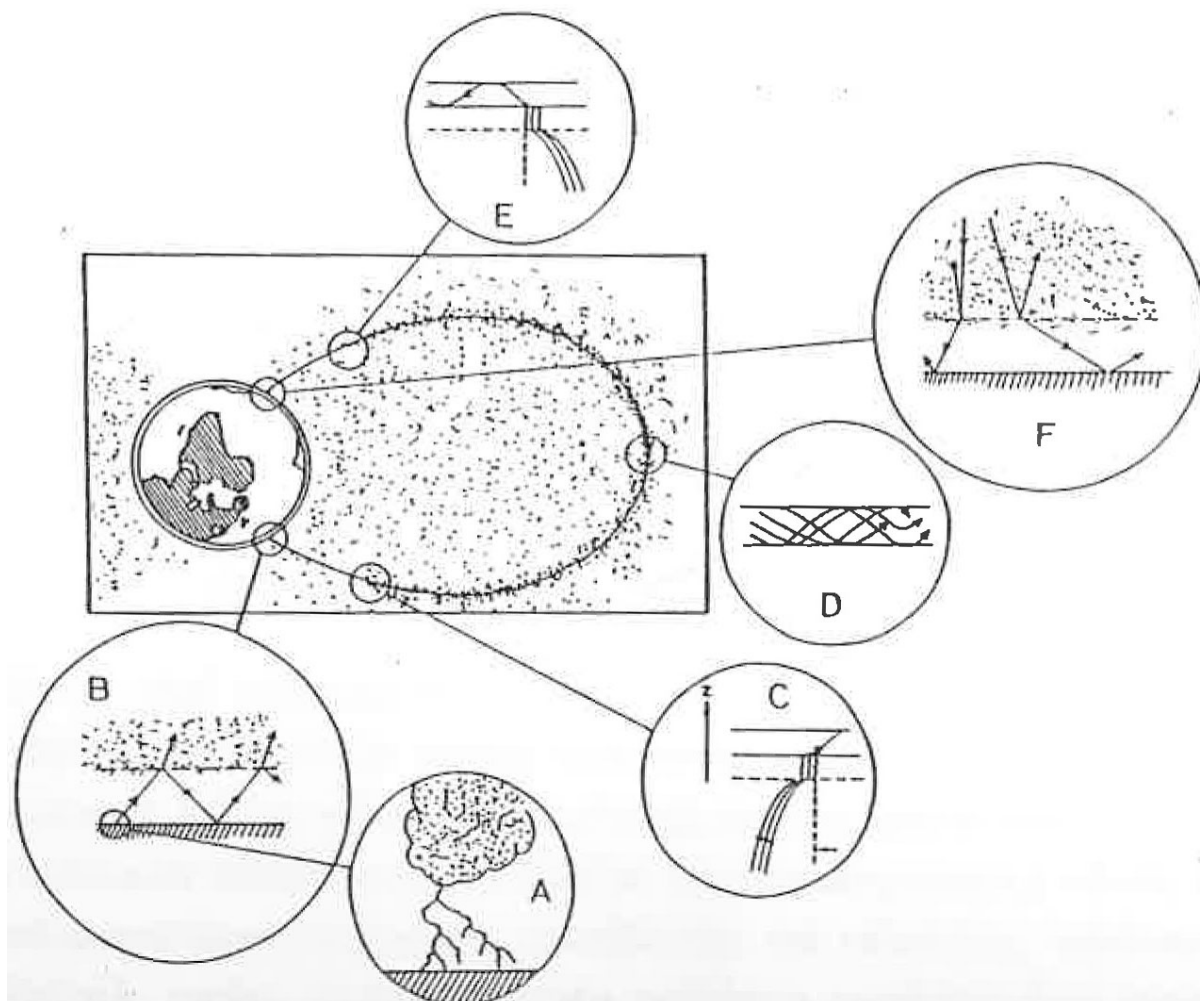
1.4.1 Vihellyksen eteneminen

Vihellyksen eteneminen on monivaiheinen prosessi. Etenemisen eri vaiheet on esitetty kuvassa 4. Vihellyksillä on taipumus kanavoitua magneettikentän voimaviivojen suuntaisille liikeradoille, joita pitkin ne etenevät ”hyppien” edestakaisin pallonpuolisolta toiselle, kunnes niiden energia kuluu loppuun. Tämä on vihellysten tärkeimpiä ominaispiirteitä, ja aiheuttaa niille ominaisen muodon ELF-VLF-spektrissä.

Vihellys saa alkunsa, kun pilvestä iskee salama (A). Salamanisku synnyttää laajakavaisen sähkömagneettisen signaalin, joka leviää iskukohdasta kaikkiin suuntiin, kunnes se kohtaa ionosfäärin alaosan. Ionosfäärin rajapinnan kohdatessaan osa aalloista läpäisee rajapinnan, mutta osa aalloista heijastuu takaisin maanpinnalle.

Takaisin heijastunut säteily jää poukkoilemaan maanpinnan ja ionosfäärin väliseen tilaan, jota kutsutaan *maa-ionosfääriaaltoputkeksi* (B). Aalto saattaa kulkea pitkänkin matkan maa-ionosfääriaaltoputkessa ennen kuin se läpäisee ionosfäärin rajapinnan. Aaltoputkessa voivat edetä aallot, joiden aallonpituuden puolikas on pienempi tai yhtäsuuri, kuin maa-ionosfääriaaltoputken korkeus.

Jos aallon läpäisykohdassa on sopivat olosuhteet, aalto joutuu ns. *vihellyskanavaan* (C), jota pitkin se kulkeutuu vastakkaiselle pallonpuoliskolle. Vihellyskanava on käytännössä elektronitihentymä, jossa elektronit ovat pakkautuneet Maan magneettikentän vaikutuksesta kenttäviivojen suuntaisesti. Vihellyskanavaan päässyt aalto etenee vihellyskanavaa pitkin (D). Edetessään aalto vuorovaikuttaa elektronien kanssa, jolloin elektronien

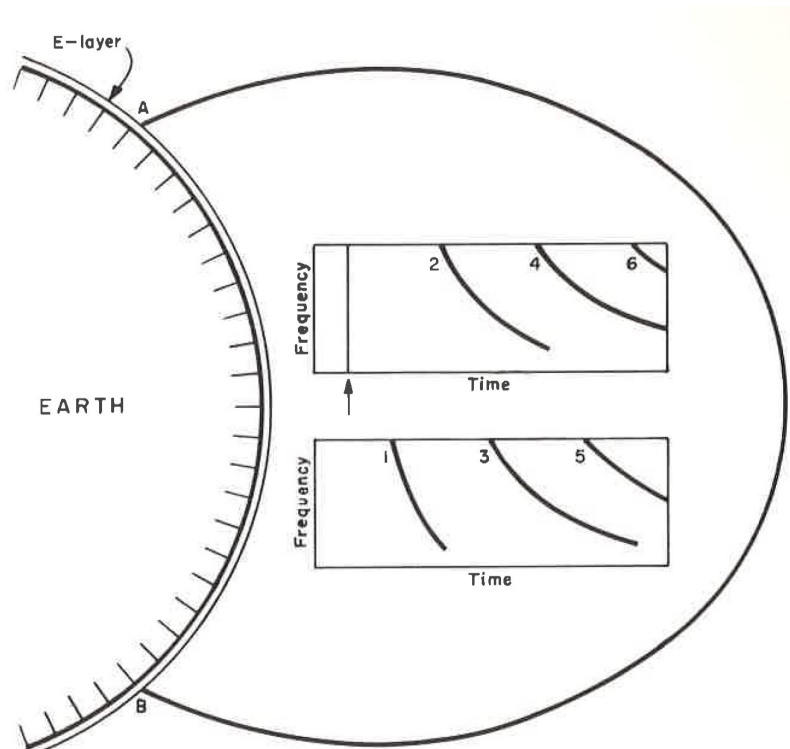


Kuva 4: Vihellyksen synty ja etenemisvaiheet [Walker, 1976]. Kuvassa nuoli kuvaa vihellyssignaalia ja pisteet vapaita elektroneja.

liike-energiaa siirtyy aallolle, ja aalto vahvistuu. Samalla aallon eri taajuuskomponentit kokevat väliaineesta riippuvaista dispersiota, jolloin kukin taajuuskomponentti liikkuu hieman eri nopeudella.

Saapuessaan vastakkaiselle pallonpuoliskolle ionosfäärin yläosaan (E) vihellyskanava loppuu ja aalto jatkaa matkaansa ionosfäärin alarajalle. Tässä osa aallon energiasta heijastuu ja jatkaa etenemistä takaisin tulosuuntaansa (F). Heijastumista tapahtuu etenkin niillä aalloilla, joiden tulokulma rajapinnan normaaliin on suuri.

Sopivien olosuhteiden vallitessa aalto kuitenkin läpäisee rajapinnan ja päätyy takaisin maa-ionosfääri aaltoputkeen, mutta lähtöpistettään vastakkaiselle pallonpuoliskolle. Jos tässä, ns. *konjugaattipisteessä* on ELF-VLF-vastaanotin, havaitaan siinä vihellys. Takaisinheijastunut aalto jää vihellyskanavaan, jossa se hyppii edestakaisin, kunnes sen energia hiipuu olemattomiin. Joskus vihellys saattaa hyppiä puolelta toiselle pitkäänkin, ennen kuin sen energia kuluu loppuun. Kuvassa 5 on esitetty tällaisen vihellyksen signaalit konjugaattipisteissä.



Kuva 5: Kaikusarjavihellyksen signaalit konjugaattipisteissä A ja B. Numero tarkoittaa ”hyppyjen” määrää, eli sitä, montako kertaa aalto on pisteessä A syntymisensä jälkeen kulkenut pallonpuoliskolta toiselle ennen saapumistaan vastaanottimeen. [Helliwell, 1965]

1.4.2 Vihellystyypit

Vihellyksiä luokitellaan etenkin niiden spektrimuodon ja syntymekanismien perusteella. Tunnetuin luokittelutapa on *Helliwellin* [1965] luokittelu (kuva 6), joka on ollut kokeellisen vihellystutkimuksen perusta jo kohta 50 vuotta. Kuvassa 6 esitellyt spektrimuodot ovat tyyppiesimerkkejä erilaisista vihellyksistä, joita ELF-VLF-vastaanottimessa voidaan havaita.

Ensimmäinen kuvassa esitetty vihellystyyppe on ns. *yhden hypyn vihellys*. Tällainen vihellys on syntynyt havaintoasemaa vastakkaisella pallonpuoliskolla. Nimensä mukaisesti se hyppää kerran maapallon puolelta toiselle, ja saapuessaan ionosfäärin rajapinnalle se läpäisee sen. Takaisin heijastunut energia hiipuu matkan aikana olemattomiin, jolloin vihellys havaitaan vastaanottimessa vain kerran.

Kahden hypyn vihellys on peräisin vastaanottimen kanssa samalta pallonpuoliskolta. Matkatessaan se on heijastunut kerran, ja palatessaan ionosfäärin rajapinnalle aalto läpäisee sen ja se havaitaan vastaanottimessa. Takaisinheijastunut energia kuluu loppuun kolmennen hypyn aikana, minkä vuoksi kahden hypyn vihellyskin havaitaan vain kerran. Kahden hypyn vihellyksessä signaali kulkee puolet pidemmän matkan kuin yhden hypyn vihellyksessä, joten sen kokema dispersio on myös suurempi. Tämän vuoksi kahden hypyn vihellyksen signaali on yhden hypyn vihellystä pitkäkestoisempi.

Hybridivihellys on samasta lähteestä peräisin olevien yhden, ja kahden hypyn vihellys-

1. Yhden hypyn vihellys (lyhyt)

2. Kahden hypyn vihellys (pitkä)

3. Hybridivihellys

4. Kaikusarjat (echo train)

A: Kuten 2., 2:4:6:8:...

B: Kuten 1., 1:3:5:7:...

5. Monikomponenttiset vihellykset (multiple-component)

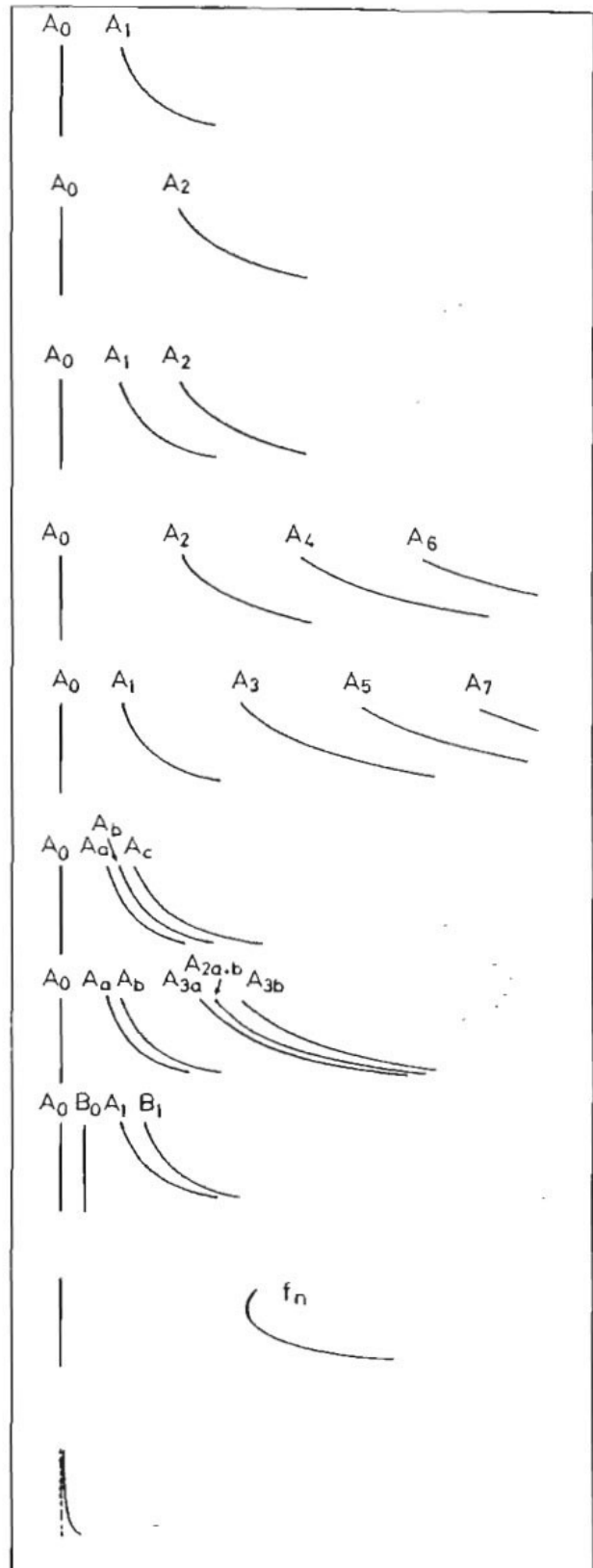
A: Monipolkuiset.

B: Sekapolkuiset.

6. Monilähteiset (multiple-source, multiflash)

7. Nenävihellys (nose whistler)

8. "Osahyppy"-vihellys



Kuva 6: Vihellystyypit [Helliwell, 1965]. Kuvassa A_0 signaali on vihellyksen synnyttämän salamaniskun signaali, ja A_1 ja sitä seuraavat ovat salamaniskusta seuranneita vihellyksiä.

lysten yhdistelmä. Hybridivihellys voi syntyä esimerkiksi silloin, kun salama iskee lähellä päiväntasaajaa. Tällöin syntyneitä aaltoja etenee jonkin matkaa maa-ionosfääriaaltoputkessa sekä pohjoiseen, että etelään, ennen kuin ne läpäisevät ionosfäärin alarajan ja kanavoituvat. Toinen aalloista havaitaan yhden ja toinen kahden hypyn vihellyksenä.

Kaikusarjat koostuvat joko yhden tai kahden hypyn vihellyksistä, syntymäpaikastaan riippuen. Ne syntyvät, kun aalto jää hyppimään vihellyskanavaan usean hypyn ajaksi. Se, havaitaanko syntynyt vihellys kaikusarjana riippuu magnetosfäärissä vallitsevista vahvistusolosuhteista, eli elektronien määrästä ja energiasta.

Monikomponenttiset vihellykset syntyvät, kun vihellys jakautuu ionosfäärin yläosassa komponentteihin ja nämä komponentit etenevät ionosfäärin läpi eri reittejä. Tällöin läpäisykohdassa on useita ”vierekkäisiä” vihellyskanavia. Kun yksi vihellys on jakaantunut komponentteihin puhutaan *monipolkuisista vihellyksistä*. Kun taas useista eri vihellyksistä peräisin olevat komponentit vaihtavat heijastumiskohdassa viereiseen kanavaan, puhutaan *sekapolkuisista vihellyksistä*. *Monilähteiset vihellykset* sen sijaan ovat peräisin eri lähteistä, mutta esiintyvät spektrissä lähellä toisiaan.

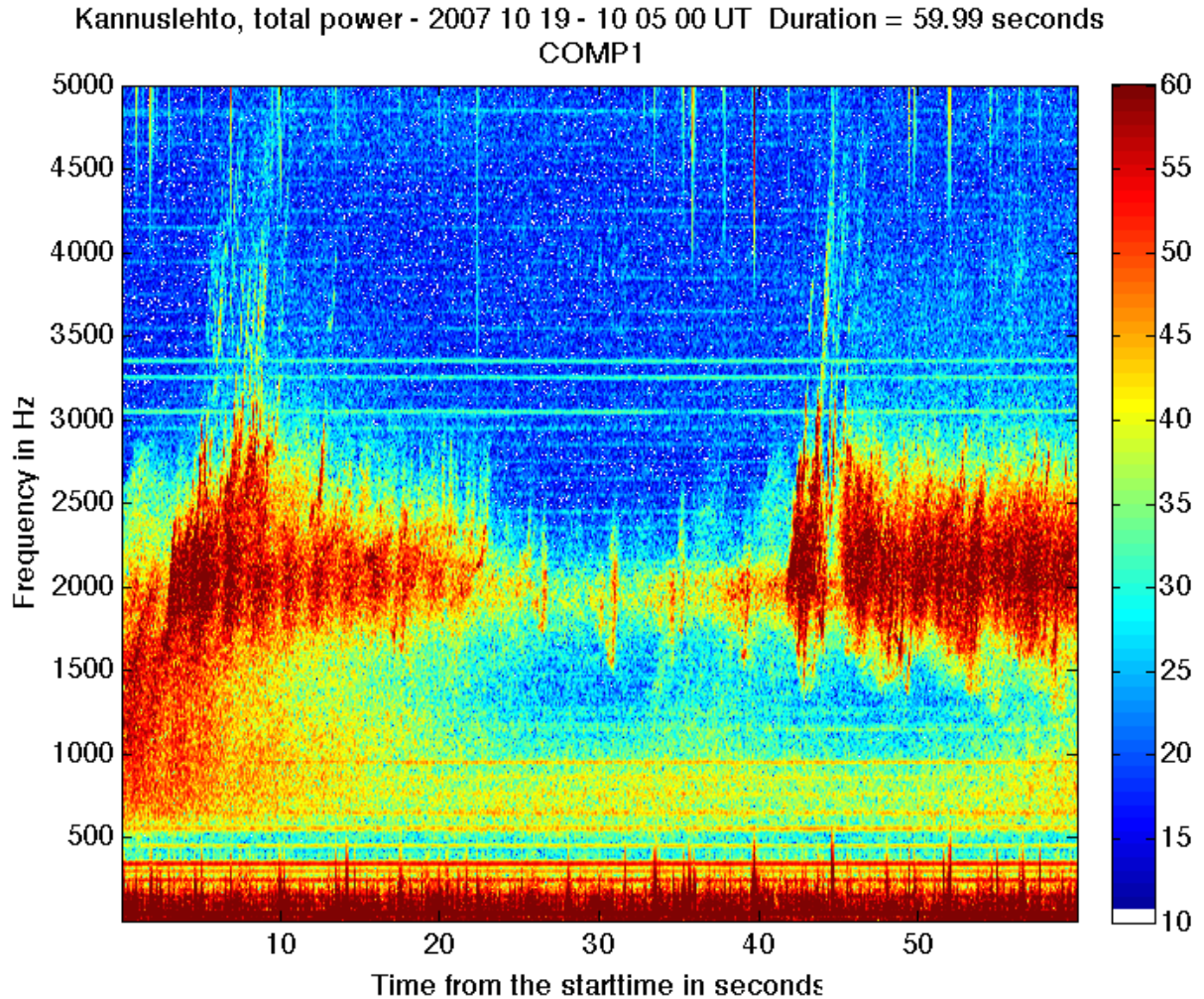
Nenävihellys on vihellys, jolla on sekä nouseva, että laskeva osa. Korkein taajuus ei siis saavukaan aina vastaanottimeen ensimmäisenä. Vastaanottimessa ensimmäisenä havaittavaa taajuutta sanotaan *nenätaajuudeksi*. Tämä on taajuus, johon dispersio vaikuttaa vähiten. Sekä nenätaajuutta korkeammat, että matalammat taajuudet viiptyvät matkalla kauemmin, jolloin vihellyksen spektri taipuu sivuttaisen paraabelin muotoon. Itseasiassa *Helliwellin* [1965] mukaan kaikki tavalliset vihellykset ovat vain nenävihellyksien laskevia osia. Nousevaa osaa ei vain yleensä havaita spektrissä.

Osahyppyvihellyksestä puhutaan, kun yhden hypyn vihellys rekisteröidään esimerkiksi satellitilla tai luotaimella ennen, kuin se on saavuttanut konjugaattipisteensä. Tällöin vihellys ehtii kulkea vain lyhyen matkan, eikä dispersio ehdi tulla merkittäväksi. Vihellyksen signaali näyttää tällöin vain yhden hypyn vihellyksen alkuosalta.

1.5 Emissiot

Salamat eivät ole ainoita luonnon omia ELF-VLF-lähteitä. Myös esimerkiksi aurinkotuuli ja revontulet synnyttävät ELF-VLF-aaltoja. Näistä syntyviä aaltoja kutsutaan emissioksi. Emissioita syntyy etenkin Maan magneettikentän muuttuessa [*Maeda and Kimura, 1963*]. Niitä aiheuttavat yleensä magnetosfääriin saapuvat energettiset, varatut hiukkaset. Myös vihellykset voivat indusoida emissioita magnetosfäärissä edetessään. Kuvassa 7 on esitetty Sodankylän Kannuslehdossa havaittuja emissioita.

Vaikka emissiot syntyvät eri lähteestä ja eri paikassa kuin vihellykset, näillä kahdella ilmiöllä on kuitenkin paljon yhteistä. Emissiot etenevät vihellysten tavoin magneettikentän kenttäviivojen suuntaisia vihellyskanavia pitkin, jolloin ne voidaan havaita maanpinnalla ELF-VLF-vastaanottimessa. Samoin tiedetään, että emissiot etenevät vihellysten tavoin



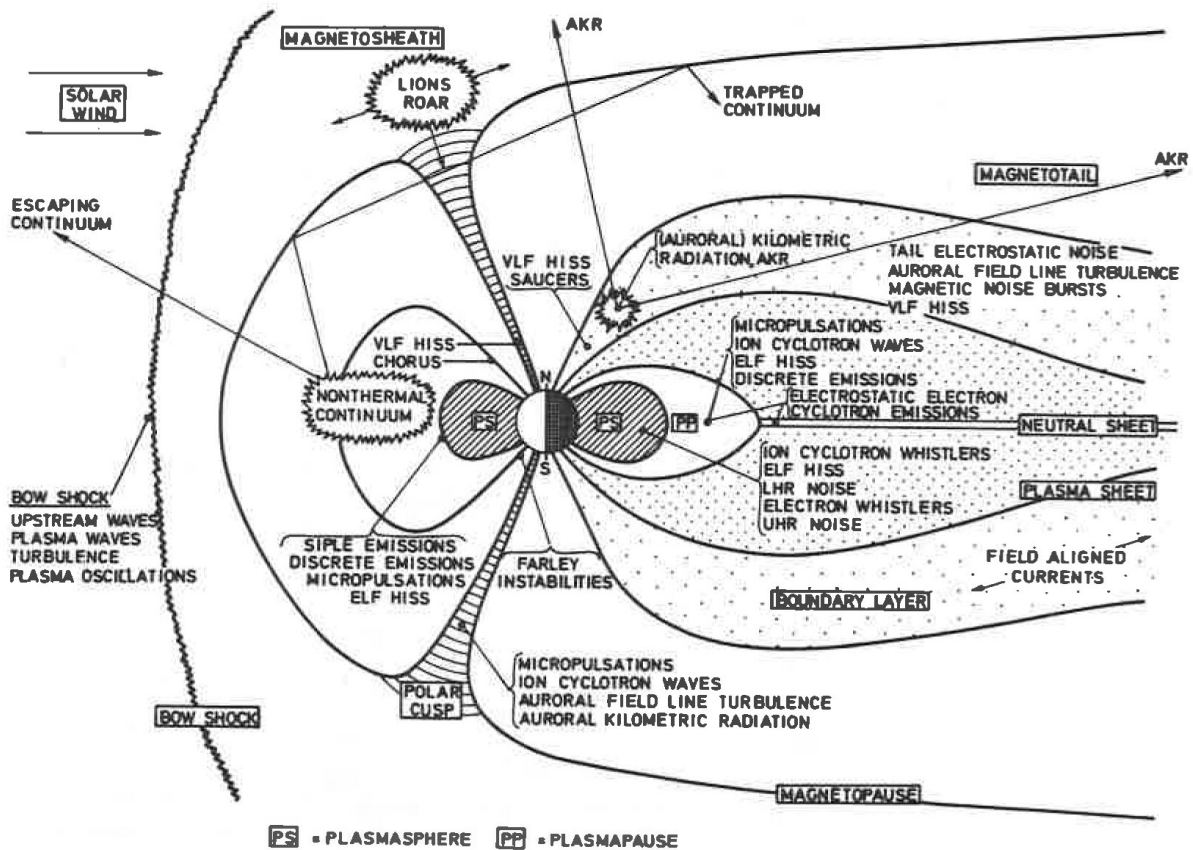
Kuva 7: Sodankylässä havaittuja kuoroemissioita

ns. *vihellysmoodissa*, eli oikeakätisesti ympyräpolaroituneena aaltona. Usein ELF-VLF-aalloista puhutaankin tämän vuoksi vihellysmoodin aaltona. Emissioiden ja vihellysten kanavoitumista ja etenemistä voidaan käsitellä samalla tavalla, kunhan huomioidaan, että niiden eteneminen alkaa vasta vihellyksen etenemisradan puolivälistä.

Satelliittimittauksilla on todistettu, että vihellyksistä poiketen emissiot syntyvät magnetosfäärissä. Kuvassa 8 on esitetty erilaisten ELF-VLF-aaltojen ja niiden kaltaisten plasma-aaltojen pääasiallisia esiintymisalueita. Yleinen periaate on, että siellä, missä on vapaita elektroneja, on myös ELF-VLF-aaltoja.

Emissioiden syntyprosessista tiedetään vihellyksiin verrattuna vielä yllättävän vähän, mikä on nähtävissä emissioiden luokittelusta. Heliwellin luokittelutapa (kuva 9) eroaa vihellysten luokittelusta pohjimmiltaan siinä, ettei siitä, mitä vastaanottimessa havaitaan, ole tarkkaa käsitystä. Emissiot on luokiteltu lähes puhtaasti sen perusteella, miltä ne kuullostavat tai näyttävät.

Emissioita on pohjimmiltaan kahdentyyppisiä, *suhinaa* ja *diskreettejä emissioita*. Suhinalla tarkoitetaan homogeenisiä kohinavöitä, kun taas diskreeteillä emissioilla on sel-



Kuva 8: Plasma-aaltojen esiintymisalueet magnetosfäärissä [Jones, 1982]. Kuvassa nähdään ELF-VLF-aalloista mm. suhinan (*hiss*), diskreettien emissioiden (*discrete emissions*), kuoron (*chorus*), vihellysten (*whistlers*), leijonankarjunnan (*lions roar*) ja revontulien kilometrisäteilyn (*auroral kilometric radiation*) esiintymisalueet.

keästi erottuva rakenne. Muut tyypit ovat lähinnä näiden hybridejä tai alalajeja. Suhinan ja diskreettien emissioiden eroavaisuuskin voidaan tosin kyseenalaistaa. Jotkut tutkijat ovat sitä mieltä, että itseasiassa suhinakin on vain diskreettejä emissioita, jotka ovat dispersoituneet tunnistamattomaksi kohinaksi.

Helliwellin emissioiden luokittelusta puuttuu joitakin laajalti tunnustettuja emissiotyyppejä. Näitä ovat mm. leijonankarjaisu [Smith and Tsurutani, 1976], revontulisuhina [Tanaka et al., 1976; Makita, 1979], suhinapilvet [Manninen, 2005] ja banded chorus [Burtis and Helliwell, 1969; Francis et al., 1983; Bell et al., 2009; Haque et al., 2011; Haque, 2012]. Lisäksi Sodankylässä tehdyissä tutkimuksissa on havaittu emissioita, jotka eivät sovi yhteen minkään tunnetun emissioluokan kanssa. Näistä valmistellaan parhaillaan julkaisuja.

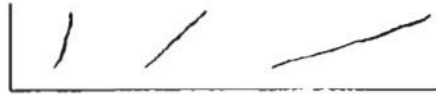
Teoriaa, joka selittäisi kollektiivisesti emissioiden ominaisuudet ei ole olemassa. Kuitenkin tietyille emissiotyypeille on kehitetty teorioita, jotka kuvaavat onnistuneesti emissioaaltojen käyttäytymistä. Yksi tämänkaltainen emissiotyyppi on Sodankylässäkin paljon tutkittu revontulisuhina.

I. Suhina

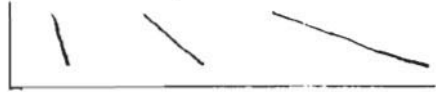


II. Diskreetit emissiot

A. Nousevat



B. Laskevat



C. Koukut

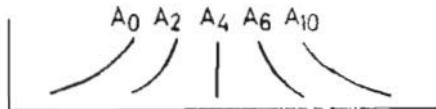


D. Yhdistelmät

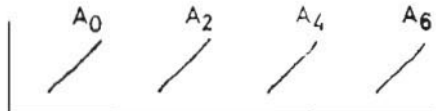


III. Periodiset emissiot

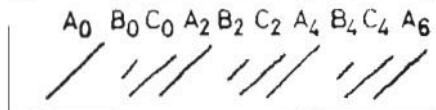
A. Dispersiiviset



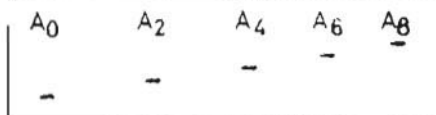
B. Ei-dispersiiviset



C. Monivaiheiset



D. Ajautuvat



IV. Kuoro



V. Kvasiperiodiset emissiot



VI. Liipaistut emissiot



Kuva 9: Emissiotyypit [Helliwell, 1965]

2 Teoriaa

ELF-VLF-ilmiöihin liittyvä teoria ei ole yksiselittistä. Kuten Helliwellin luokittelusta (kuvat 6 ja 9) nähdään, ilmiöitä on monenlaisia ja kunkin syntymekanismi on omanlaisensa. Siksi kaikenkattavaa teoriaa ELF-VLF-aalloista on mahdotonta esittää. Tyydyn siksi kuvaamaan tärkeimpiä osateorioita, jotka ovat hyödyllisiä useimpia ilmiöitä käsitellessä. Koska ELF-VLF-aaltojen syntyminen on vielä osittain mysteeri, keskityn aaltojen etenemisen teoriaan. Aihetta kuvaava teoria on laaja ja yksityiskohtainen ja siihen syvennyminen ylittäisi tämän tutkielman laajuuden. Keskityn yhtälöiden johtamisen sijaan enemmänkin esittelemään aiheeseen liittyviä käsitteitä ja tärkeimpiä suureita.

Emissioiden ja vihellysten matemaattinen tarkastelu perustuu pitkälti sähkömagneettisen aallon etenemiseen kylmässä, magnetoituneessa plasmassa. Muita matemaattisesti olennaisia aspekteja ovat aallon taittuminen, dispersio, aaltomoodit, sähkömagneettisten aaltojen vuorovaikutus varattujen hiukkasten kanssa sekä maapallon magnetosfäärin ominaisilmiöt.

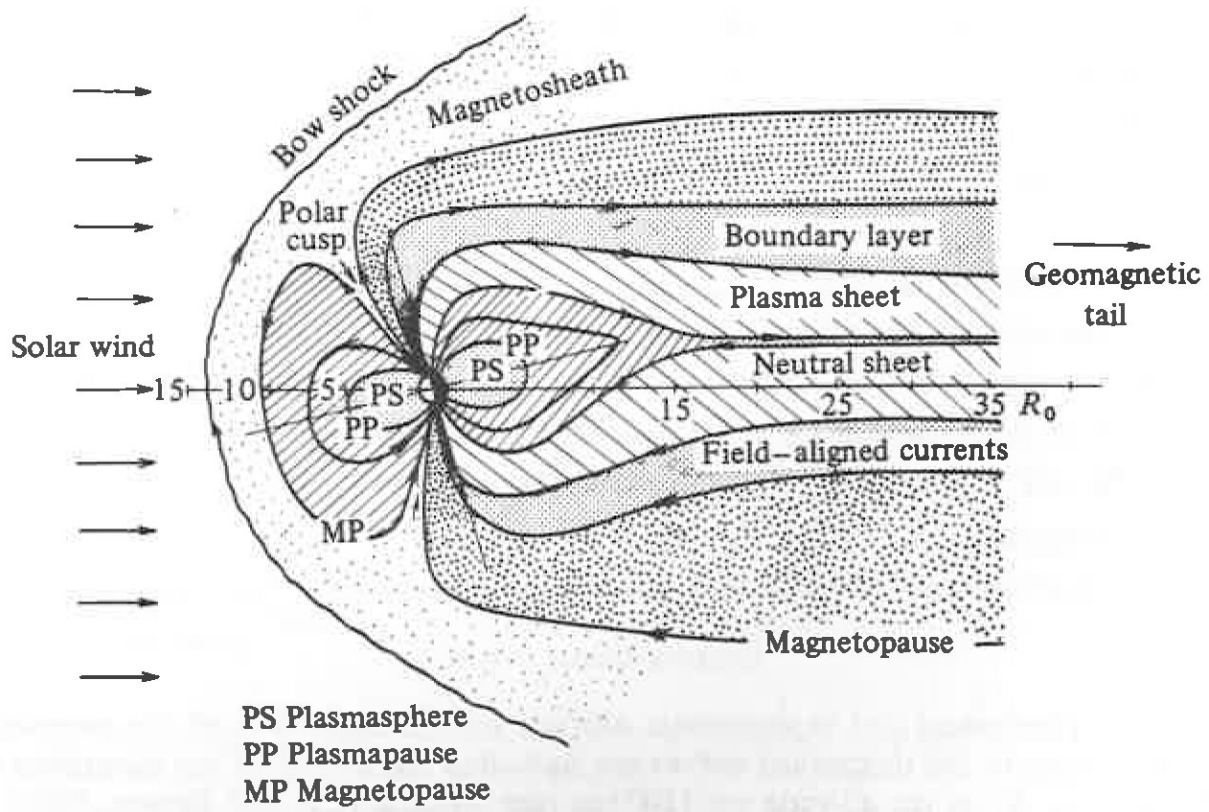
2.1 Magnetosfääri

Lähtökohtaisesti maapallon magneettikenttä on dipolikenttä, eli se muistuttaa tavallisen sauvamagneetin magneettikenttää. Auringosta lähtevä hiukkasvirta, aurinkotuuli, kuitenkin muuttaa Maan magneettikentän muotoa. Aurinkotuuli koostuu neutraaleista ja varauksellisista hiukkasista ja sillä on oma magneettikenttä. Aurinkotuulen vaikutuksesta maapallon magneettikenttä ei todellisuudessa muistutakaan enää dipolikenttää.

Aurinkotuuli litistää Maan magneettikentän uloimmat kerrokset päiväpuolelta ja venyttää ne pitkäksi ”hännäksi” yöpuolella. Päiväpuolella magnetosfääri ulottuu n. 70 000 km:n päähän Maasta, kun taas yöpuolella se venyy aina n. 7 000 000 km:n päähän maapallosta. Magnetosfääri on dynaaminen järjestelmä, sillä Auringon aktiivisuus muuttaa sen muotoa olennaisesti.

Magnetosfääri sisältää erilaisia alueita, joista jokainen on omanlaisensa fysikaalinen systeemi. Magnetosfäärin rakenne on esitetty kuvassa 10. ELF-VLF-aaltojen kannalta tärkein osa on plasmasfääri. Tämä osa se avaruuden osa, jossa hiukkaset esiintyvät ionisoituneina, ja täten siellä esiintyy ELF-VLF-aaltojen energisoinnille välttämättömiä vapaita elektroneja. Plasmasfääri on magnetosfäärin sisin osa.

Plasmasfäärin ulkoreuna, eli plasmapausi sijaitsee yleensä noin 4 – 5 Maan säteen päässä maanpinnasta. Magneettisten myrskyjen aika plasmapausi siirtyy aurinkotuulen vaikutuksesta lähemmäksi maanpintaa. Käytännössä plasmapausi on raja, jossa elektronitiheys laskee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Vihellykset etenevät plasmapausin sisällä, mikä on loogista, kun ajatellaan plasmasfääriä elektronitihentymänä. Plasmapausin muoto mukailee Maan magneettikentän kenttäviivaa. Tämä tarkoittaa, ettei kaikkein korkeimmilla leveyspiireillä vihellyksiä juuri havaita. Tämä on tulos, joka pätee yleisesti kokeelli-



Kuva 10: Magnetosfäärin rakenne [Al'pert, 1990]

sisä mittauksissa.

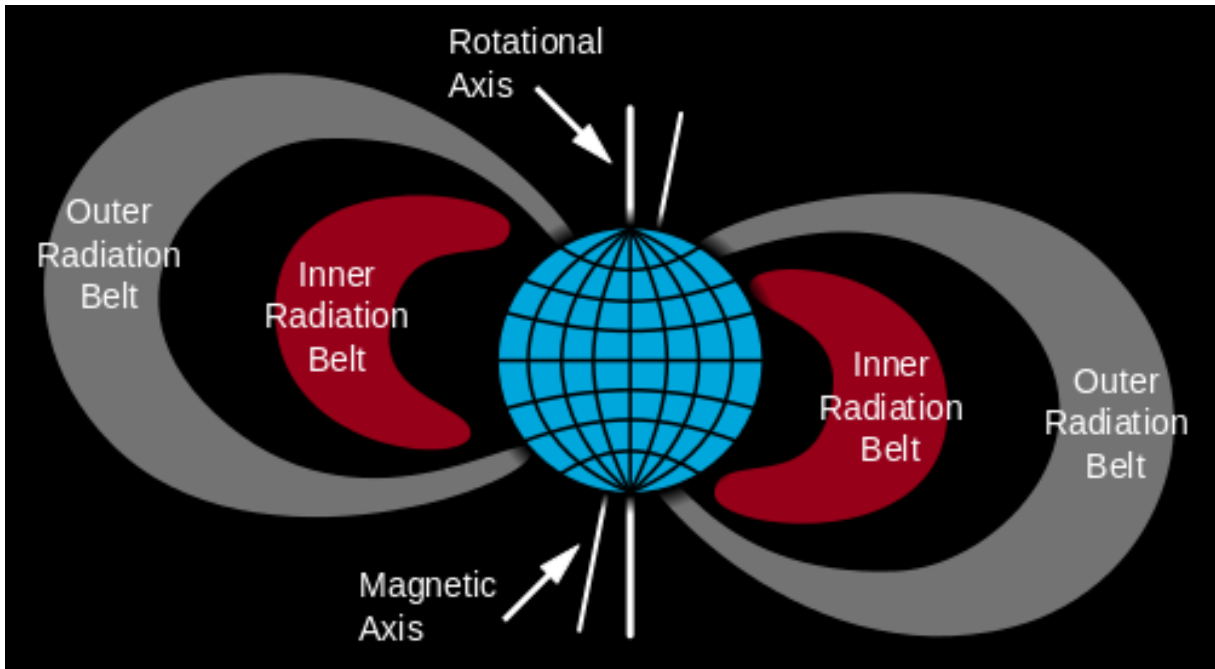
Jos taas tarkastellaan Auringosta saapuvia varattuja hiukkasia, on loogista ajatella, että todennäköisimmin ne indusoivat emissioita viimeistään kohdassa, jossa hiukkanen saapuu elektronitihentymään. Tämän vuoksi emissioden syntyalueena pidetään plasmapausin ulkopuolista aluetta, mitä tukee myös kuva 8 (sivu 12). Plasmapausin avaruudellisen sijainnin vuoksi emissioita havaitaan eniten korkeilla leveysasteilla, mitä kokeelliset mittaukset tukevat.

Eräs ELF-VLF-aaltojen kannalta tärkeä magnetosfäärin sisäinen rakenne on Van Allenin vyöhykkeet (kuva 11). Ne ovat kaksi toroidin muotoista vyöhykettä, jotka sisältävät Maan magneettikentän vangitsevia varattuja hiukkasia. Sisempi vyöhyke koostuu protonista ja ulompi energettisistä elektroneista. Vyöhykkeiden välissä on ns. ”turvallinen alue”, jossa varattuja hiukkasia ei esiinny.

Hiukkasten korkean energiatason vuoksi Van Allenin vyöt ovat vaaraksi satelliiteille ja avaruuslentojen miehistölle, ja siksi ne ovat tärkeä tutkimuskohde avaruustieteessä. Vyöhykkeet sijaitsevat avaruudessa osittain limittäin plasmasfäärin kanssa. Kuten plasmasfääriin, myös Van Allenin vyöhykkeisiin vaikuttaa Auringon aktiivisuus, ja magneettisten myrskyjen aikana vyöhykkeet muuttavat sijaintiaan ja ylilatautuvat singoten hiukkasia ilmakehään. Van Allenin vyöhykkeitä kutsutaan usein säteilyvyöhykkeiksi.

Koska ulompi Van Allenin vyö koostuu elektroneista, sillä on olennainen yhteys ELF-

VLF-aaltoihin. Itseasiassa ELF-VLF-aallot aiheuttavat vöiden välissä olevan tyhjän alueen. Tämä on nimittäin kuoroemissioiden pääasiallinen esiintymisalue, ja aalto-hiukkasvuorovaikutuksen seurauksena ELF-VLF-aallot sinkoavat elektronit pois alueelta [Bortnik and Thorne, 2007]. Niinikään ELF-VLF-aalloista johtuu ulomman Van Allenin vyön korkea energiataso. ELF-VLF-aaltojen ja elektronien välisessä vuorovaikutuksessa aallot kiihdyttävät elektronit useiden miljoonien elektronivolttien (MeV) energioihin [Horne et al., 2005].



Kuva 11: Van Allenin vyöhykkeet

Magnetosfäärin sisäosissa, plasmapausin sisäpuolella aurinkotuulen vaikutus magneettikentän muotoon ei enää ole merkittävä. Plasmasfäärissä magneettikentälle voidaan käyttää dipoliapproksimaatiota. Tällöin magneettivuon tiheys pienenee etäisyyden kasvaessa ja leveyspiirin lähestyessä ekvaattoritason. Dipolikentän magneettivuon tiheyden voimakkuutta kuvaa kaava

$$|B| = \frac{B_0}{R^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

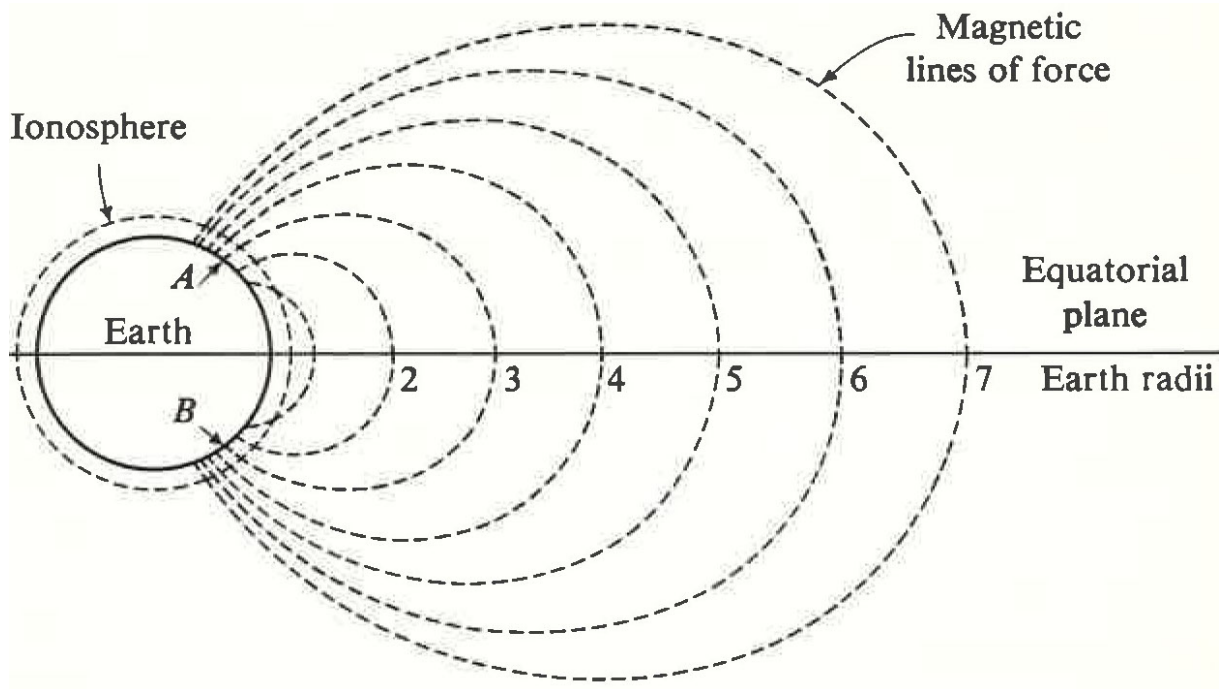
missä B on magneettivuon tiheys, R on etäisyys Maan keskipisteestä Maan säteissä, θ on magneettinen leveysaste ja B_0 on magneettivuon tiheyden arvo maanpinnan ekvaattorilla. Todellisuudessa B_0 vaihtelee paikallisesti pituuspiirin mukaan, mutta yleensä dipoliapproksimaatiossa suurelle käytetään keskimääräistä likiarvoa $B_0 = 31200$ nT.

Maapallon dipolikentän yksittäisiä kenttäviivoja identifioidaan sen mukaan, mikä on niiden pisin etäisyys maapallon keskipisteestä (kuva 12). Tätä etäisyyttä kuvaa suure L , missä $1 L$ on Maan säteen pituus, n. 6371 km. Jos tiedetään kenttäviivan leikkauskohta maanpinnalla, saadaan kenttäviivan L :n arvo määritettyä yksinkertaisesti dipolikentän

geometrian perusteella kaavalla

$$L = \frac{1}{\cos^2(\theta)}, \quad (2)$$

missä L on kenttäviivan etäisyys Maan keskipisteestä ekvaattoritasossa ja θ on magneettinen leveysaste. L on tärkeä suure geofysiikassa, ja usein julkaisuissa paikkojen maantieteellisiä sijainteja kuvataan sillä, mitä L :n arvoa vastaavalla kenttäviivalla ne sijaitsevat.



Kuva 12: Maan magneettikentän voimaviivat [Davies, 1969]

2.2 Plasma

Plasma on yksi aineen olomuoto, jolla tarkoitetaan ionisoitunutta kaasua. Magnetosfäärissä sitä esiintyy etenkin plasmapausissa. Plasma on tärkeä elementti käsiteltäessä magnetosfäärin fysiikkaa ja sille onkin omistettu oma fysiikan ala, plasmafysiikka. Koska plasma toimii ELF-VLF-aaltojen etenemisen väliaineena, plasman olemus on tärkeä määrittelijä ELF-VLF-aaltojen ominaisuuksissa.

Plasma koostuu ionisoituneista hiukkasista, eli ioneista ja elektroneista, joten plasma on ulkoisesti likimain neutraalia. Plasmassa hiukkasten välillä vaikuttavat sähkömagneettiset vetovoimat. Jotta ionisoituneesta kaasusta voidaan puhua plasmana, täytyy varaus-ten sijaita riittävän lähellä toisiaan, jolloin nämä voimat olennaisesti dominoivat plasmahiukkasen sijaintia. Plasma-alueen täytyy myös olla suuri hiukkasten väliseen etäisyyden

verrattuna, jotta plasman sisäisten voimien kollektiivisuus toteutuu ja reunailmiöt voidaan jättää huomiotta.

Plasmassa tapahtuu kaiken aikaa sähköistä ja hiukkasten paikallista fluktuaatiota. Tätä neutraaliuden stabiilisuutta kuvataan *plasmataajuudella*. Jos plasman elektronia häiritään paikallisesta sähköisestä tasapainoasemastaan, kohdistuu siihen ympärillä olevien hiukkasten aiheuttama kollektiivinen sähköinen voima, joka vetää elektronin takaisin paikalleen. Tällaista elektronien oskillointia tapahtuu plasmassa jatkuvasti, ja oskillointitaajuutta kutsutaan elektronin plasmataajuudeksi. Tämä saadaan kaavasta

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \varepsilon_0}}, \quad (3)$$

missä ω_{pe} on elektronin plasmataajuus, N_e on plasman elektronitiheys, e on alkeisvaraus, m_e on elektronin massa, ja ε_0 on tyhjiön permittiivisyys.

Elektronit hallitsevat plasman värähtelyä, sillä protonit ja ionit eivät hitautensa vuoksi ehdi vaikuttua sähköisistä epähomogeenisuuksista. Jotta järjestelmän plasmaluonne toteutuu, elektronin plasmataajuuden täytyy olla suuri verrattuna elektronien ja neutraalien hiukkasten törmäysten esiintymistäajuuteen.

Kylmällä plasmalla tarkoitetaan plasmaa, joiden hiukkasilla ei ole termistä energiaa. Todellisuudessa täysin kylmää plasmaa ei voi olla olemassa, mutta tietyissä tilanteissa se on toimiva approksimaatio. Jos plasmassa kulkevan aallon vaihenopeus on erittäin suuri verrattuna plasman termiseen nopeuteen, ei hiukkasten lämpöliike vaikuta aallon etenemiseen, ja plasmaa voidaan käsitellä kylmänä plasmana. ELF-VLF-aaltojen vaihenopeuksilla kylmän plasman approksimaatio on todettu toimivaksi [Bittencourt, 1986].

Jos plasma on homogeenistä, voidaan siinä kulkevaa sähkömagneettista aaltoa tarkastella *magnetoionisen teorian* avulla. Tämän kehitti Ratcliffe [1959]. Magnetoioninen teoria on yleispätevä teoria vihellysten ja emissioiden matemaattisessa käsittelyssä, ja se mainitaan lähes kaikissa ELF-VLF-aaltojen etenemisen teoriaa käsittelevissä julkaisuissa. Magnetoioninen teoria tiivistyy käytännöllisimpään muotoonsa *Appleton-Hartreen yhtälössä*, jossa kuvataan ns. *magnetoionisen väliaineen* taitekertoimia sähkömagneettisen aallon etenemisessä. Magnetoionisella väliaineella tarkoitetaan staattisessa magneettikentässä olevaa kylmää, homogeenistä ja äärettömän laajaa plasmaa. Kun rajataan systeemi sopivasti, plasmaa voidaan käsitellä magnetoinonisena väliaineena.

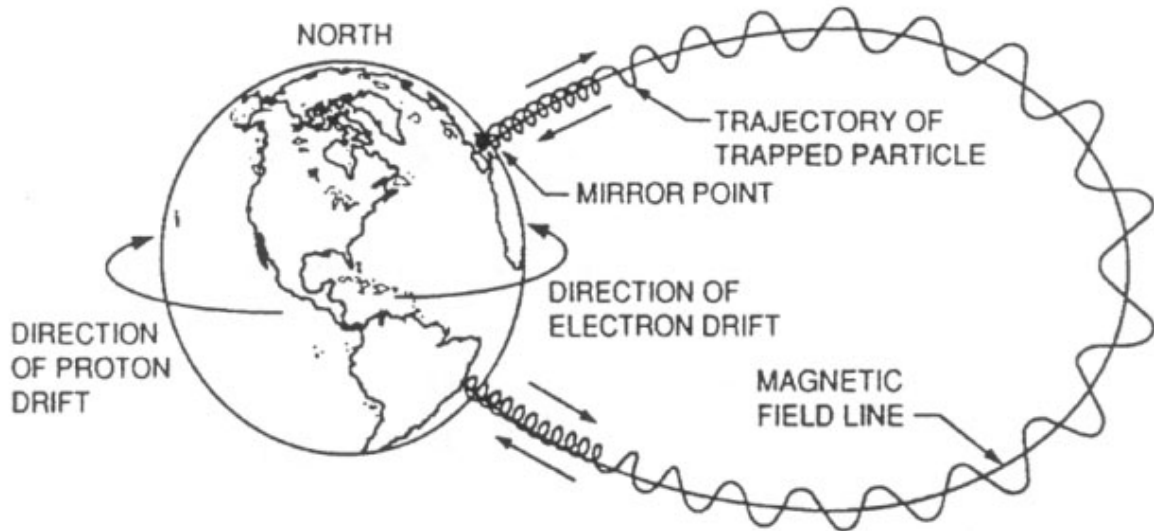
Kylmä plasma on tärkein fysikaalinen konsepti ELF-VLF-aaltojen kasvun ja etenemisen määrittäjänä. Koska plasman ionien ja protonien liiketaajuudet ovat liian alhaisia, jotta ELF-VLF-taajuudet vuorovaikuttaisivat niiden kanssa, ovat plasman elektronit se tekijä, joka loppupeleissä määrittää suurimman osan ELF-VLF-aaltojen ominaisuuksista. Tämän vuoksi ELF-VLF-aalloista puhutaan usein elektroniplasma-aaltona, ja niiden plasmafysikaalinen käsittely voidaan yleensä rajata pelkästään elektroneihin.

2.3 Aalto-hiukkasvuorovaikutus

ELF-VLF-aaltojen pääasiallisella esiintymisalueella plasmasfäärissä, maapallon magneettikenttä aiheuttaa epähomogeenisuuksia plasman elektronitiheyteen. Magneettikentän indusoima Lorentzin voima aiheuttaa magneettikentässä liikkuville elektroneille radiaalisen kiihtyvyyden, joka on kohtisuorassa magneettikenttää ja hiukkasen nopeutta vastaan. Tällöin elektronit joutuvat ns. *gyroliikkeeseen*, jossa radiaalinen kiihtyvyys taivuttaa elektronin liikeradan kenttäviivan ympärille kierteiksi (kuva 13). Liikkeen komponentit on esitetty kuvassa 14. Elektronin gyroliikettä kuvaa suure gyrotaajuus, joka saadaan kaavasta

$$f_{ce} = \frac{1}{2\pi} \frac{e}{m_e} B, \quad (4)$$

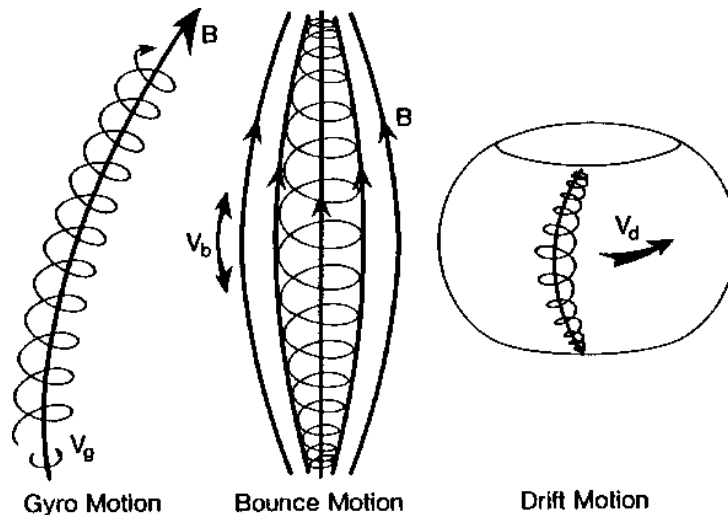
missä f_{ce} on elektronin gyrotaajuus, e on alkeisvaraus, B on magneettivuon tiheys ja m_e on elektronin massa.



Kuva 13: Magneettikenttään vangitun varatun hiukkasen liikerata [Walt, 1994]

Sekä emissioiden että vihellysten etenemiseen magnetosfäärissä liittyy käsite vihellyskanava. Vihellyskanava on magneettikentän kenttäviivan ympärille kasautunut elektronitihentymä, joka pysyy kasassa magneettikentän vaikutuksesta. Vihellyskanava koostuu magneettikenttään vangituista elektroneista, jotka liike-energiallaan vastaavat ELF-VLF-aaltojen energisoinnista ja läsnäolollaan luovat vihellysmoodin aallon etenemiselle vaadittavat taitekerroinolosuhteet. Vihellyskanava toimii metallijohtimen tavoin signaalin etenemispolkuna, jossa elektronit mahdollistavat aallon etenemisen. Magneettikenttään gyroliikkeeseen vangitut elektronit ovat siis syy, miksi vihellykset ja emissiot etenevät kenttäviivojen suuntaisesti.

Vihellysten ja emissioiden pitkäkestoisen etenemisen edellytys on ulkoinen energisäätö. Muutoin aallon energia kuluu hukkaan, eikä se saavuta koskaan vastaanotinta, eikä



Kuva 14: Magneettikenttään vangitun elektronin liikkeen komponentit: gyromotion, poikkoilu maapallon puoliskolta toiselle magneettista kenttäviivaa pitkin, sekä ajautuminen, jossa elektronit kulkeutuvat lännestä itään.

näin tule havaituksi. Energian saanti tapahtuu aalto-hiukkasvuorovaikutuksesta vihellyskanavan elektronien kanssa. Kenttäviivan ympärille pakkautunut elektronitihentymä luo olosuhteet, joissa ELF-VLF-aalto saa tarvittavan lisäenergian edetäkseen maanpinnalle saakka.

Käytännössä aalto-hiukkasvuorovaikutus on seurausta siitä, että oskilloiva varattu hiukkanen hiukkanen säteilee sähkömagneettisen aallon, jonka taajuus vastaa hiukkasen oskillointitaajuutta. Sopivissa *resonanssiolosuhteissa* syntyneiden aaltojen ja vihellysmoodin aaltojen interferenssistä aiheutuu vihellysmoodin vahvistuminen. Vahvistus ei kuitenkaan ole ainoa ELF-VLF-aaltojen ja magneettikentän elektronien vuorovaikutuksen seuraus. Aalto-hiukkasvuorovaikutus aiheuttaa myös emissioiden liipaisu- ja sekä elektronipresipitaatiota, jolla tarkoitetaan elektronien karkaamista tarkasteltavasta järjestelmästä. Elektronipresipitaatiota tapahtuu etenkin ulommalla Van Allenin vyöhykkeellä.

2.4 Vihellysmoodi

Sähkömagneettisten aaltojen aaltoyhtälöllä on tiettyjä ominaisarvoja, eli moodeja. Nämä ovat aaltoyhtälön reaalisia ratkaisuja, eli moodit ovat niitä aaltotyyppisiä, joita luonnossa on mahdollista olla olemassa. Vihellysmoodi on ratkaisu, joka kuvaa oikeakätisesti ympyräpolaroitunutta aaltoa. Lisäksi magnetoioninen teoria asettaa vihellysmoodille kaksi raja-arvoa; vihellysmoodin aallon eteneminen on mahdollista vain, kun aallon taajuus on pienempi sekä paikallista elektronien gyrotajuutta, että plasman oskillointitaajuutta.

Muille, paitsi kaikkein matalataajuisimmille vihellysmoodin aalloille ionien vaikutus plasman ominaisuuksiin on olematon, jolloin plasmataajuutena voidaan pitää elektronin plasmataajuutta. Niitä vihellysmoodin aaltoja, joihin ionien värähtely vaikuttaa, kutsu-

taan *hydromagneettisiksi aalloiksi*.

Vihellysmoodin aallolle on ominaista taajuudesta riippuvainen etenemisnopeus, mistä johtuu niille tyypillinen spektrimuoto. Etenemisnopeuden määrää väliaineen, eli kylmän plasman, optinen tiheys. Tätä kuvaa hyödyllisimmin taitekerroin

$$n = \frac{c}{v}, \quad (5)$$

missä n on väliaineen taitekerroin, c on valon nopeus tyhjiössä ja v on väliaineessa kulkevan aallon nopeus. Appleton-Hartreen yhtälön perusteella taitekerroin määrittää vihellysmoodin topologiset ominaisuudet, eli moodin määrittelevät raja-arvot. Käytännössä väliaineen taitekertoimen määrää suurimmilta osin elektronitiheys, mikä on hyvä tapa havainnollistaa vihellysmoodin ominaisuuksia.

Vihellysmoodin väliaine on anisotrooppista, eli sen taitekerroin on riippuvainen aallon normaalin ja magneettisen kenttäviivan välisestä kulmasta. Tästä ominaisuudesta seuraa vihellysmoodin kanavoituminen. Väliaineen taitekertoimen gradientti magneettisen kenttäviivan läheisyydessä määrittää eri kanavoitumistavat. Tästä seuraa esimerkiksi se tulos, että vihellysmoodin aallot etenevät elektronitihetymissä. Kanavoitumismoodia, joka mahdollistaa aallon etenemisen elektronitihetyksessä kuvaa väliaine, jonka optinen tiheys kasvaa magneettisen voimaviivan lähistössä. Tällä tavoin käyttäytyvä väliaine toteutuu vain, kun aallon taajuuden ja elektronien gyrotaajuuden suhde on puolet tai sitä pienempi, eli

$$f \leq \frac{1}{2}f_{ce}, \quad (6)$$

missä f on aallon taajuus ja f_{ce} on elektronin gyrotaajuus. Tämä tärkeä tulos määrittää vihellysmoodin aallot sellaisiksi, jotka etenevät elektornitihetyksessä ja sen pätevyys on todistettu kokeellisesti.

Jos taajuuden ja gyrotaajuuden suhde on suurempi kuin 0,5, taitekertoimen ratkaisu kuvaa väliainetta, jonka optinen tiheys laskee magneettikentän voimaviivan ympäristössä, ja kasvaa äärettömiin kenttäviivan etäisyyden kasvaessa. Tällainen väliaine on erääläinen ”vajauskanava”, esimerkiksi elektroniharventuma, jossa taitekerroin laskee magneettikentän voimaviivan ympäristössä. Tällainen kanavoitumismoodi on mahdollista saavuttaa, mutta kanavoitumismoodin aallot vaativat vähintään 0,5 MHz taajuuden läpäistäkseen ionosfäärin rajapinnan ja tullakseen havaituksi maanpäällä, joten niitä ei havaita ELF-VLF-vastaanottimissa [Park, 1982].

3 Mittaukset Sodankylässä

3.1 ELF-VLF-tutkimus Sodankylässä

Sodankylän geofysiikan observatoriossa on toiminut ELF-VLF-tutkimusryhmä 1980-luvulta lähtien. Nykyinen ELF-VLF-tutkimus Sodankylässä sai alkunsa neuvostoliittolaisten Aktivnyij-satelliittiprojektin maanpintamittauksiin osallistumisesta. Tähän liittyen Lapissa tehtiin VLF-rekisteröintejä tavoitteena vastaanottaa satelliitista lähetettyjä aaltoja. Projekti epäonnistui satelliittivian takia ja näin projektia varten Sodankylässä rakennetuilla vastaanottimilla alettiin satelliittisignaalien sijaan havainnoimaan luonnon omia VLF-aaltoja.

Sodankylän geofysiikan observatoriossa on tehty ELF-VLF-mittauskampanjoita vuodesta 1987. Tämänhetkinen mittausasema ja sijaitsee Kannuslehdossa, n. 40 km Sodankylän keskustasta (kuva 15). Viime vuosina mittauskampanjoita on toteutettu keskimäärin kaksi vuodessa, joista kussakin ELF-VLF-signaalia mitataan olosuhteista riippuen yhtäjaksoisesti 1–2 kuukauden ajan 24 tuntia vuorokaudessa. Signaalia mitataan 0–39 kHz kaistalla 24 bitin resoluutiolla.



Kuva 15: SGO:n ELF-VLF-mittausaseman sijainti kartalla.



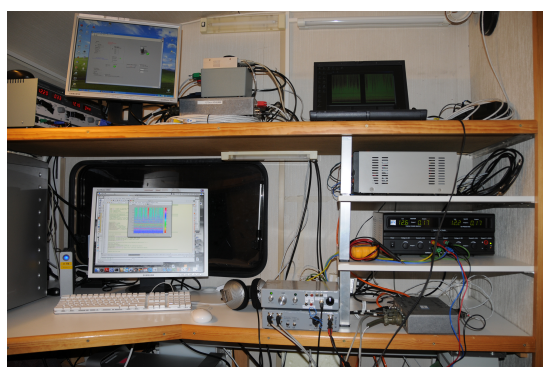
Kuva 16: Mittausasema. Laitteisto on sijoitettu asuntovaunuun sääoloilta suojaamiseksi. (Kuva J. Manninen)

Sodankylässä ELF-VLF-signaaleja havainnoidaan laitteistolla, joka koostuu mm. antennista, vahvistimista ja suodattimista (kuva 17). Laitteisto vastaanottaa kaikkialta siihen saapuvia radiotajuisia signaaleja. Vastaanottimesta raakadata talletetaan tietokoneelle ja analysoidaan. Analysointitulokset esitetään kuvina, joista antennin vastaanottamat signaalit voidaan nähdä havainnollisesti. Sodankylän geofysiikan observatorion ELF-VLF-mittausaseman laitteiston kaaviokuva on esitetty kuvassa 18.

Sodankylässä nykyisin tehtävä ELF-VLF-tutkimus on kokeellista ja keskittyy korkea-laatuisten mittausaineiston tuottamiseen ja havainnointiin. Aineiston laatu ja mittavuus houkuttelevat tutkijoita kansainvälisesti, ja julkaisuja erilaisista ELF-VLF-ilmiöistä kirjoitetaan Sodankylässä useita joka vuosi. ELF-VLF-aaltojen avulla Sodankylässä on tutkittu mm. revontulia [Tagirov *et al.*, 1999], magneettisia pulsaatioita [Manninen *et al.*, 2010] ja sitä, vaikuttaako ihmisen toiminta magnetosfääriin käyttäytymiseen [Karinen *et al.*, 2002].

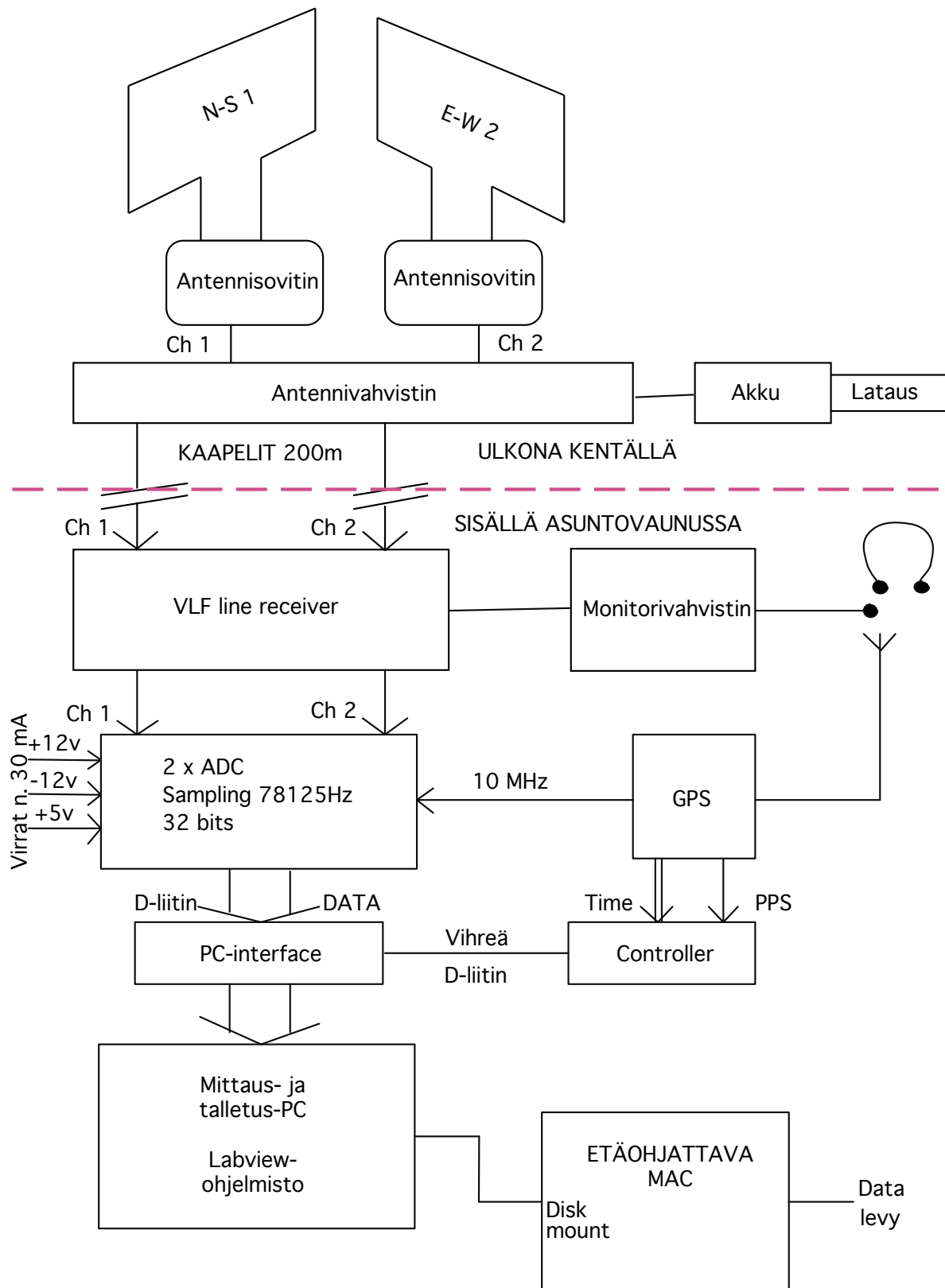


(a) Antennit. Toinen antenneista kuvaa N/S-suunnassa ja toinen E/W-suunnassa. (Kuva J. Manninen)



(b) Joitakin asuntovaunussa olevia mittalaitteita. (Kuva J. Manninen)

Kuva 17: Mittauslaitteisto



Kuva 18: Sodankylän geofysiikan observatorion ELF-VLF-mittausaseman laitteiston kaaviokuva

3.2 Tuloksia 2013c-mittauskampanjasta

Tarkastellaan ensin hieman mittauspaikan geofysikaalisia parametrejä. Sodankylän geofysiikan observatorion ELF-VLF-mittausasema sijaitsee Sodankylän Kannuslehdossa $67^{\circ}44'$ pohjoista leveyttä ja $26^{\circ}16'$ itäistä pituutta. Kioton *World Data Center for Geomagnetism* (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/>) ilmoittaa vastaavan magneettisen sijainnin olleen vuonna 2013 keskimäärin magneettisella leveyspiirillä $64,31^{\circ}$ ja pituuspiirillä $119,66^{\circ}$. Kyseiseltä leveyspiiriltä lähtee magneetikentän kenttäviiva, jonka L :n arvo on 5,32 (kaava 2).

Dipolimallin (kaava 1) mukaan kyseisen kenttäviivan ekvaattoritasossa, eli leveysasteella 0, magneettivuon tiheys on 207,21 nT. Tämä on tietenkin likiarvo, ja voi vaihdella paljonkin esim. magneettisten myrskyjen seurauksena. Magneettivuon tiheyden avulla saadaan arvio elektronin gyrotaajuudelle ekvaattoritasossa sillä kenttäviivalla, joka leikkaa maanpinnan SGO:n ELF-VLF-vastaanottimen sijaintipaikassa (kaava 4). Suuntaa antavaksi arvioksi gyrotaajuudelle saadaan

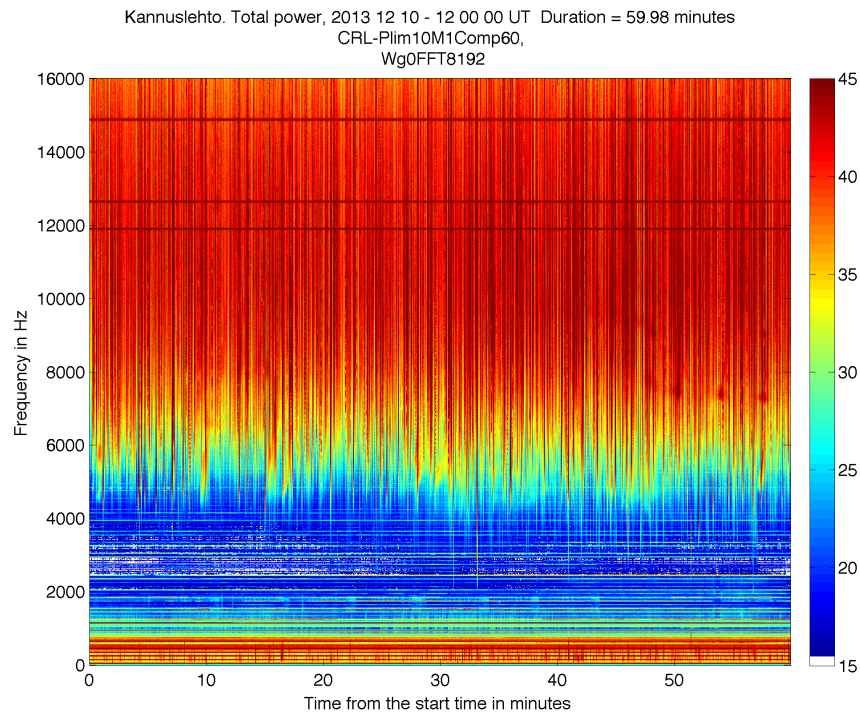
$$f_{ce-eq} \approx 5,8 \text{ kHz.}$$

Oletetaan nyt, että tässä avaruuden pisteessä syntyy emissio. Kanavoitumisteorian (kaava 6) mukaan kanavoitumaan pääsevät vain ne taajuudet, jotka ovat alle puolet paikallisesta elektronin gyrotaajuudesta. Kannuslehdosta lähtevän kenttäviivan tapauksessa tällaisia ovat taajuudet $f \leq 2,9 \text{ kHz}$. Jos tällainen emissio syntyy, kanavoituneet taajuudet kulkevat kenttäviivaa $L = 5,32$ pitkin ionosfäärin rajapinnalle, ja läpäistessään ionosfäärin ne havaitaan Kannuslehdossa. Kynnystaajuutta 2,9 kHz suuremmat taajuudet jäävät kanavoitumattomina poukkoilemaan magnetosfääriin.

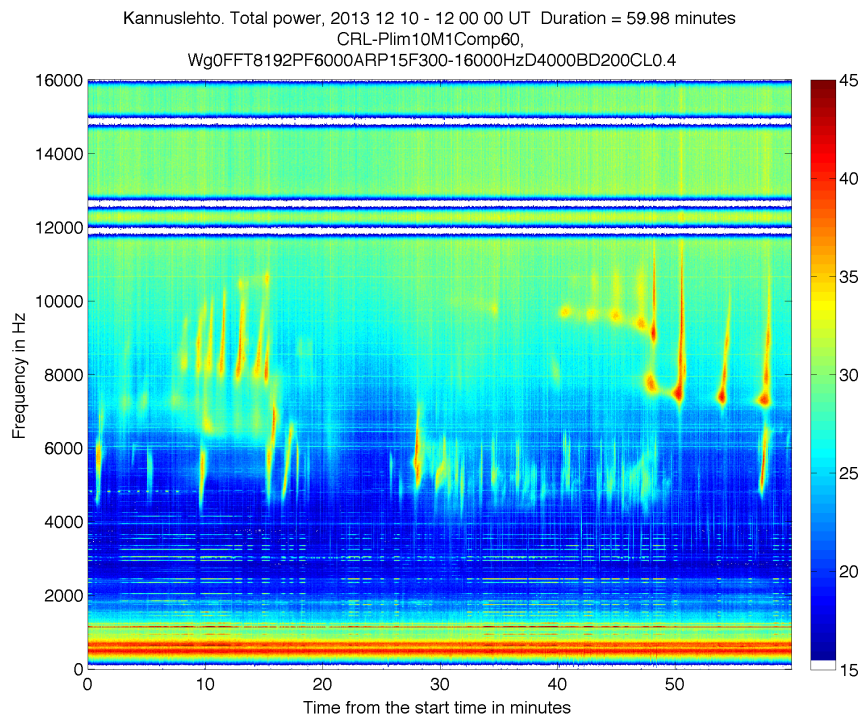
Yleensä 2,9 kilohertsiä huomattavasti korkeataajuisempia ilmiöitä on ELF-VLF-spekt-rissä mahdotonta havaita, sillä ympäri maapalloa tapahtuvasta salamoinnista aiheutuva laajakaistainen säteily peittää intensiteetillään korkeammat taajuudet. Sodankylässä on viimeisen kymmenen vuoden aikana kehitetty analyysimenetelmä, joka suodattaa salamoinnin aiheuttaman häiriön erittäin hyvin. Kuvissa 19 ja 20 on esitetty Sodankylän Kannuslehdossa 10.12.2013 klo 12 - 13 UT mitatun datan värispektriesitys. Kuvassa 19 raakadatan analyysi on tehty ilman salamasuodatinta ja kuvassa 20 salamasuodatinta käyttäen.

Kuvasta 20 huomataan, että salamaniskujen signaalit ovat intensiteetillään peittäneet joukon korkeataajuisia ELF-VLF-emissioita, joiden taajuus ylittää selvästi jopa 12 kilohertsiin. Näiden emissioiden taajuus ylittää siis huomattavasti teoreettisen maksimiarvon $0,5f_{ce-eq} \approx 2,9 \text{ kHz}$. Korkeataajuisien, 12 kHz emissioiden ja vastaavan ekvatoriaalisen gyrotaajuuden $f_{ce-eq} = 5,8 \text{ kHz}$ suhde on jopa 2,07. Toisin sanoen havaittujen emissioiden taajuudelle pätee

$$f \leq 2,07 f_{ce-eq},$$

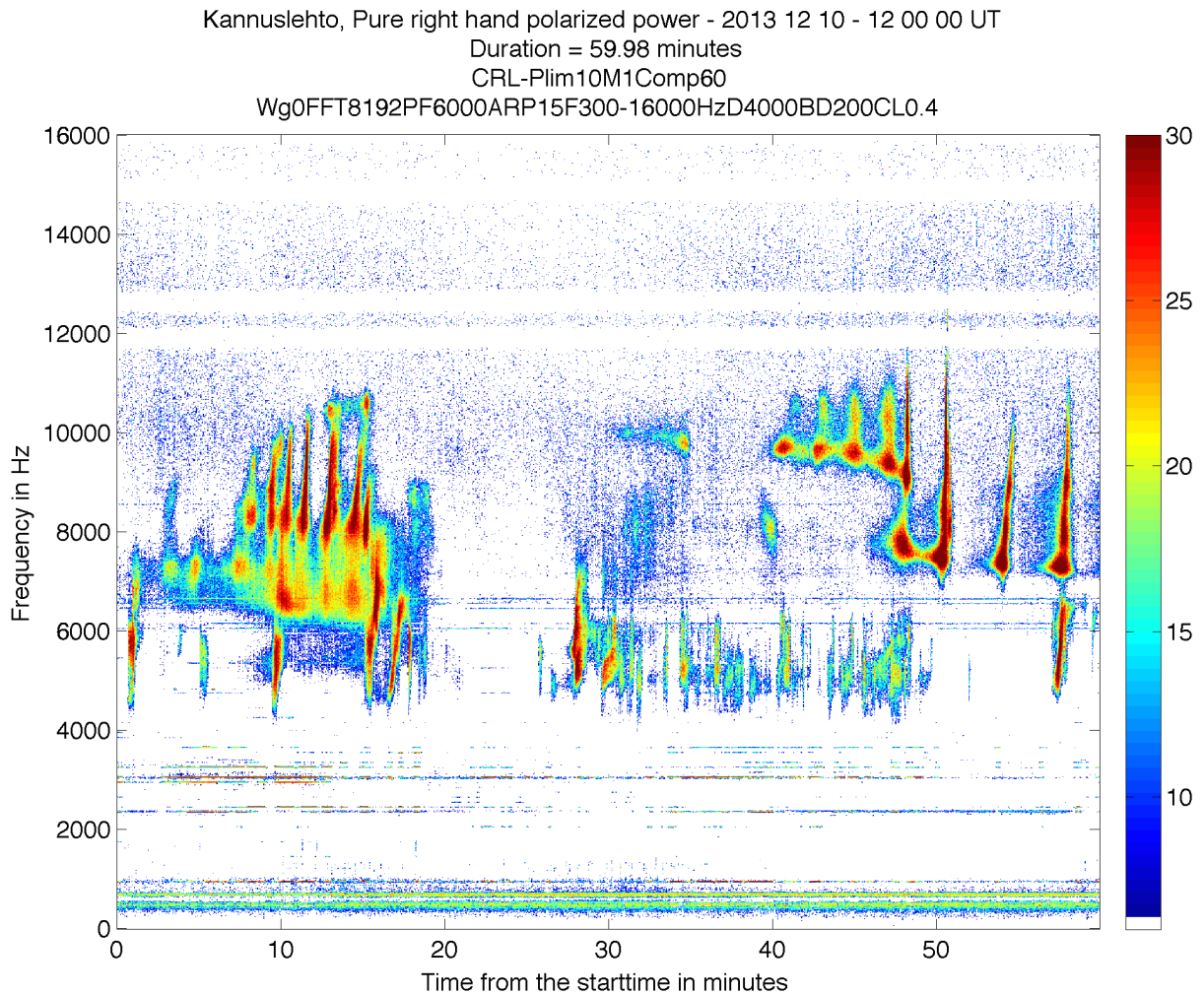


Kuva 19: Suodattamaton spektri. Voimakkaat, lyhytkestoiset ja laajakaistaiset pystysuorat signaalit ovat salamaniskujen signaaleja. Taajuuksilla 12 kHz, 12,75 kHz ja 15 kHz näkyvät kapeakaistaiset, jatkuvat vaakasuorat signaalit ovat VLF-navigointiasemien signaaleja.



Kuva 20: Spektri on muutoin sama, kuin kuvassa 19, mutta tämän spektrin analyysissä on käytetty salamasuodatinta. Myös VLF-navigointiasemien signaalit on suodatettu las-kennallisista syistä

mikä on tiettävästi suurempi arvo, kuin mitä kokeellisista mittauksista on aikaisemmin raportoitu. Itseasiassa suhteen arvot $\frac{f}{f_{ce}} > 1$ eivät kuvaa enää edes vihellysmoodia, mutta kuvaa 21 tarkasteltaessa huomataan, emissiot näyttäisivät kuitenkin olevan oikeakätisesti ympyräpolarisoituneita aaltoja. Sodankylässä joulu-tammikuussa 2013-2014 tehdyssä mittauskampanjassa mitatusta 40 päivästä 26 päivänä löydettiin suodattamisen jälkeen tämänkaltaisia tapahtumia, joissa emissioiden taajuus ylittää jopa 14 kilohertsiin.



Kuva 21: Spektrin oikeakätisesti ympyräpolarisoitunut teho. Väriskaalan yksiköt ovat desibelejä.

3.3 Spekulointia

Yleinen käsitys ELF-VLF-tiedeyhteisössä on, että emissiot syntyvät pääasiassa ekvaattoritasossa. Ekvaattoritaso on nimittäin se alue, jossa elektronien ja ELF-VLF-aaltojen aalto-hiukkasvuorovaikutus yleensä tapahtuu. Kuitenkin se, että Sodankylässä havaitut emissiot olisivat syntyneet kenttäviivan $L = 5,32$ ekvaattorilla, vaikuttaa absurdilta emissioiden korkeasta taajuudesta johtuen.

Mistä nämä emissiot sitten oikein tulevat? Kuvassa 20 näkyvän 12 kilohertsin emissioon

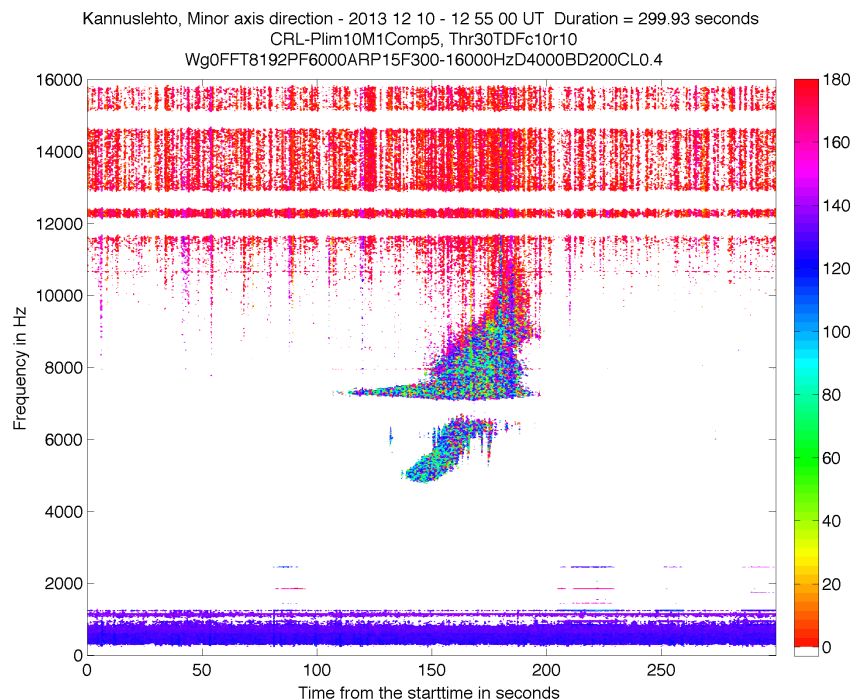
on täytynyt kanavoitua paikassa, jossa elektronien gyrotaajuus on 24 kHz tai enemmän. Tämä vastaa magneettikentän arvoja $B \leq 857,37$ nT. Nämä magneettikentän arvot löytyvät kaavan 1 mukaan alueelta

$$R \leq \sqrt[3]{\frac{31200}{857,37}} \sqrt[6]{1 + 3 \sin^2 \theta}.$$

Jos oletetaan, että emissio on syntynyt ekvaattoritasossa, saadaan etäisyydeksi kulman arvolla 0 etäisyydeksi saadaan $R \leq 3,31$ maan sädettä. Tällöin mahdollisia syntypaikkoja olisivat niiden kenttäviivojen ekvaattoritaso, missä L :n arvo on 3,31 tai pienempi. Tätä vastaa magneettinen leveyspiiri $56,66^\circ$, eli maantieteellinen leveyspiiri $47^\circ 02'$ ja sitä pienemmät. Nämä löytyvät Kannuslehdon magneettiselta pituuspiiriltä Laatokasta etelään.

Onko siis mahdollista, että Sodankylässä vastaanotetut aallot olisivat peräisin Laatokan alueelta? Kysymykseen voidaan saada vastaus tarkastelemalla aallon ratakulmaa. Sodankylässä käytettävällä kahden ortogonaaliantennin mittaumenetelmällä voidaan määrittää, missä kulmassa aalto on tullut antenniin, mutta tulokulmaan jää 180 asteen ambiguuteetti. Jos esimerkiksi aallon ratakulmaksi saadaan 0° , se tarkoittaa, että aalto on tullut joko pohjoisesta, tai etelästä.

Tarkastellaan nyt ajankohtana 12:55–13:00 UT havaitun emission ratakulmaa. Tämä on esitetty kuvassa 22. Kuvasta huomataan, että emission signaali sisältää pikseleitä väriskaalan kaikista väreistä. Emissio näyttäisi saapuvan antenniin *yhtäaikaan kaikista ilmansuunnista*. Jotta analysointi tuottaa tällaisen tuloksen, aallon täytyy saapua antenniin kohtisuoraan ylhäältä, ionosfääristä.



Kuva 22: Signaalin ratakulma. Väriskaalan asteikko on asteita. Kulmat 0° ja 180° kuvaavat pohjois-eteläsuuntaa ja kulma 90° kuvaa itä-länsisuuntaa. Kulma kasvaa vastapäivään.

Ratakulman analyysin tulos tarkoittaa, että aalto on syntynyt avaruudessa Sodankylään osoittavalla kenttäviivalla kauimmillaan paikassa, jossa syntyvien aaltojen kanssa vuorovaikuttavien elektronien gyrotaajuus vastaa teorian mukaista arvoa ≤ 28 kHz. Vastaava magneettivuon tiheys oli siis $\leq 857,37$ nT ja Kannuslehdon kenttäviivaa vastaava magneettinen leveysaste $64,31^\circ$. Näillä saadaan kaavan 1 avulla määritettyä emission syntyalueeksi ne kenttäviivalla $L = 5,32$ sijaitsevat pisteet, jotka ovat Maan keskipisteestä korkeintaan $4,07$ Maan säteen etäisyydellä. Toisin sanoen

$$R \leq 4,07R_E : L = 5,32.$$

missä R_E kuvaa maan sädettä.

Kuvaa 12 (sivu 17) tarkastelemalla voidaan arvioida karkeasti, että emission syntyalue osuu kenttäviivalle noin Kannuslehdon ja ekvaattoritason puolivälin paikkeille kohtaan, jossa kenttäviivan etäisyys ekvaattoritasosta on kaikkein suurin. Tämä on mielenkiintoinen päätelmä, sillä yleensä emissioiden syntyalueena pidetään ekvaattoritasoa.

3.4 Tulevaisuuden suunnitelmia

Ennen kuin päteviä väitteitä Sodankylässä havaittujen emissioiden syntyperästä voidaan esittää, vaaditaan aineiston kartoittamista, perinpohjaista aiheeseen perehtymistä ja lisätutkimusta. Imiö on niin uusi, että aluksi pitäisi kartoittaa emissioiden tarkempia ominaisuuksia, kuten emissioiden tyyppiä, kestoa, kaistaa, ajankohtaa ja magneettista korrelointia. Tämän jälkeen voidaan alkaa pohtia, minkälaista uutta tietoa korkeataajuuksiset emissiot antavat vihellysmoodin aaltojen synnystä, tai muista niihin liittyvistä luonnonilmiöistä.

On vain luonnollista, että maa-asemilla muualla maailmassa tämänkaltaisia emissioita ei ole havaittu, sillä ilman salamansuodatintekniikkaa salamaniskuista aiheutuva häiriö peittää korkeammat taajuudet intensiteetillään. Mielenkiintoista on kuitenkin se, miksi satelliittimittauksissa ei ole havaittu Sodankylässä havaittuja korkeataajuisia emissioita. Magnetosfäärissä salamat eivät peitä signaaleillaan korkeampia taajuuksia, ja siksi Sodankylässä havaittujen kaltaisten emissioiden pitäisi olla arkipäiväisiä satelliittien keräämässä aineistossa. Tämä on yksi näkökulma, joka vaatii tulevaisuudessa lisää paneutumista.

Koska tämänkaltaisia emissioita ei ole havaittu aikaisemmin, ei niistä ole vielä julkaisujakaan. Ainoat aiheetta sivuavat julkaisut käsittelevät ns. *banded chorus* ilmiötä, joita Sodankylässä tehdyissä havainnoissa ei esiinny. Banded chorusta ovat tutkineet Stanfordin yliopistossa esim. *Burtis and Helliwell* [1969], *Francis et al.* [1983], *Bell et al.* [2009], *Haque et al.* [2011], ja *Haque* [2012]. Mittauksissa havaittujen emissioiden taajuudet ovat kuitenkin olleet korkeimmillaankin vain $0,65f_{ce-eq}$, eli kynnystaajuuden välittömässä läheisyydessä. Stanfordin näiden emissioiden syntyalueeksi on määritetty ekvaattoritason lähialueet. Banded chorus-ilmiön syntymisen takana olevaa teoriaa on pohdittu paljon

esim. Landau-vaimennuksen osalta. Teorihin tulee ehdottomasti perehtyä tulevaisuudessa Sodankylässä havaittujen emissioiden ymmärtämiseksi.

Kynnystaajuuden ylittäviä ELF-VLF-ilmiöitä on pohdittu hypoteettisesta näkökulmasta ainakin yhdessä artikkelissa. *Bernhardt* [1979] on tutkinut kynnystaajuuden taajuuksilla $0,6f_{ce-eq}$ ylittäviä vihellyksiä simulaatioiden avulla, ja nimennyt ilmiön ”supervihellykseksi”. Tutkimuksessaan hän toteaa, että erityisolosuhteet vihellyskanavan leikkauksen läpimitassa ja muodossa, sekä nollakulma magneetikentän ja aaltokulman välillä mahdollistavat supervihellyksien syntymisen. Bernhardtin supervihellykset etenevät ensin kanavoituneita, mutta ekvaattoritason läheisyydessä ”tippuvat” vihellyskanavasta, etenevät jonkin matkaa kanavoitumattomina ja kanavoituvat uudestaan matalilla leveyspiireillä. Bernhardtin teoria ansaitsee tulevaisuudessa tulla perinpohjaisesti tutkituksi. Voisiko vaikka olla, että Sodankylässä olisi havaittu ensimmäiset ”superemissiot”?

4 Yhteenveto

ELF-VLF-aallot ovat radioaaltoja, joiden taajuus on 3 Hz – 30 kHz. Niitä voidaan tuottaa keinotekoisesti, mutta niitä esiintyy maapallolla myös luonnostaan. Luonnossa esiintyy kahdentyyppisiä ELF-VLF-ilmiöitä, vihellyksiä ja emissioita. Vihellykset syntyvät salamaniskusta, kun emissiot taas syntyvät yleensä magnetosfääriin saapuvista hiukkaspurkauksista. Näistä kahdesta vihellysilmiö on perinpohjaisesti tutkittu. Emissiot sen sijaan ovat vuosikymmenten ajan pysyneet yhtenä geofysiikan mysteereistä. Kummallekin ilmiölle on yhteistä magneettikentän kenttäviivojen suuntainen eteneminen magnetosfäärissä.

Kokeellinen emissiotutkimus on aikaisemmin rajoittunut salamaniskujen aiheuttaman voimakkaan radiokohinan vuoksi vain mittauskaistan alimpiin kilohetrseihin. Sodankylässä on viimeisen kymmenen vuoden aikana kehitetty salamansuodatintekniikka, joka ”puhdistaa” korkeammat taajuudet salamaniskuista. Salamansuodattimen käyttöönoton myötä Sodankylässä havaittiin, että korkeamman taajuudet ovat täynnä emissioita, joiden olemassaolosta ei olla aikaisemmin tiedetty mitään.

Emissiotutkimukselle käyttökelpoisen mittauskaistan laajentuminen luo uuden näkökulman koko ELF-VLF-tutkimukseen. Salamansuodatintekniikka avaa verhot, joiden takaa emissioita on katsottu viiden vuosikymmenen ajan. Salamoinnin vaikutuksesta ELF-VLF-tutkijat muualla maailmalla eivät ole edes tietoisia, minkälainen maailma salamoiden takaa löytyy. Korkeataajuisten emissioden löytyminen luo paineita jatkotoimenpiteille, kuten havaintojen luokittelulle ja korrelointien selvittämiselle.

ELF-VLF-tutkimukselle on ominaista inversio-tyyppinen analyysi, jossa päättelyketju alkaa seurauksesta ja päättyy syyhyn. Peruslähtökohtana on havainnoida kaikkea mahdollista ELF-VLF-taajuuksilla tapahtuvaa ja sen jälkeen alkaa eritellä erilaisia tapahtumia ja pohtia, mistä ne ovat lähtöisin. Aina päättelyketju ei saavuta päämääräänsä, ja lopputuloksena on oikea signaalien heinäsuopa, jossa jokainen neula on enemmän tai vähemmän rubiikinkuutio. Konteksti tarjoaa tässä mielessä erinomaiset puitteet teoreettiselle tutkimukselle, johon kohdistuu uuden aineiston valossa suuret odotukset. Olisiko pian aika tutkijoita vuosikymmenet hämmentäneiden emissioden mysteerin ratkaisemiselle?

Viitteet

- Al’pert, Y. (1990), *Space Plasma, Volume I: Theory and main properties*, Atmospheric and space science series, Cambridge University Press.
- Barkhausen, H. (1919), Zwei mit hilfe der neuen versträker entdeckte erscheinungen, *Physik Z*, 20, 401–403.
- Bell, T. F., U. S. Inan, N. Haque, and J. S. Pickett (2009), Source regions of banded chorus, *Geophysical Research Letters*, 36(11), doi:10.1029/2009GL037629.
- Bernhardt, P. A. (1979), Theory and analysis of the ‘super whistler’, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 84(A9), 5131–5142, doi:10.1029/JA084iA09p05131.
- Bittencourt, J. A. (1986), *Fundamentals of plasma physics*, Pergamon Press.
- Bortnik, J., and R. M. Thorne (2007), The dual role of ELF/VLF chorus waves in the acceleration and precipitation of radiation belt electrons, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(3), 378–386, doi:10.1016/j.jastp.2006.05.030.
- Burtis, W. J., and R. A. Helliwell (1969), Banded chorus—a new type of VLF radiation observed in the magnetosphere by OGO 1 and OGO 3, *Journal of Geophysical Research*, 74(11), 3002–3010, doi:10.1029/JA074i011p03002.
- Carpenter, D. L. (1963), Whistler evidence of a ‘knee’ in the magnetospheric ionization density profile, *Journal of Geophysical Research*, 68(6), 1675–1682, doi:10.1029/JZ068i006p01675.
- Christian, H. J., R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, W. L. Boeck, D. E. Buechler, K. T. Driscoll, S. J. Goodman, J. M. Hall, W. J. Koshak, D. M. Mach, and M. F. Stewart (2003), Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D1), 4005, doi:10.1029/2002JD002347.
- Davies, K. (1969), *Ionospheric Radio Waves*, Blaisell Publishing Company.
- Eckersley, T. L. (1931), 1929-1930 developments in the study of radio wave propagation, *Marconi Rev.*, 5(1), 1–8.
- Francis, C., H. Strangeways, and K. Bullough (1983), Discrete VLF emissions (7–9 kHz) displaying unusual banded and periodic structure, *Planetary and Space Science*, 31(5), 537 – 557, doi:10.1016/0032-0633(83)90043-0.
- Grard, R., A. Pedersen, J. G. Trotignon, C. Beghin, M. Mogilevsky, Y. Mikhailov, O. Molchanov, and V. Formisano (1986), Observations of waves and plasma in the environment of comet Halley, *Nature*, 321(6067s), 290–291, doi:10.1038/321290a0.

- Gurnett, D. A., R. R. Shaw, R. R. Anderson, W. S. Kurth, and F. L. Scarf (1979), Whistlers observed by Voyager 1: Detection of lightning on Jupiter, *Geophysical Research Letters*, *6*(6), 511–514, doi:10.1029/GL006i006p00511.
- Gurnett, D. A., W. S. Kurth, and F. L. Scarf (1981), Plasma waves near Saturn: Initial results from Voyager 1, *Science*, *212*(4491), 235–239, doi:10.1126/science.212.4491.235.
- Gurnett, D. A., W. S. Kurth, F. L. Scarf, and R. L. Poynter (1986), First plasma wave observations at Uranus, *Science*, *233*(4759), 106 – 107.
- Gurnett, D. A., W. S. Kurth, F. L. Scarf, R. L. Poynter, L. J. Granroth, I. H. Cairns, W. M. Macek, S. L. Moses, F. V. Coroniti, C. F. Kennel, and D. D. Barbosa (1989), First plasma wave observations at Neptune, *Science*, *246*(4936), 1494 – 1497.
- Gurnett, D. A., R. L. Huff, J. S. Pickett, A. M. Persoon, R. L. Mutel, I. W. Christopher, C. A. Kletzing, U. S. Inan, W. L. Martin, J.-L. Bougeret, H. S. C. Alleyne, and K. H. Yearby (2001), First results from the Cluster wideband plasma wave investigation, *Annales Geophysicae*, *19*(10/12), 1259–1272.
- Haque, N. (2012), Source region characteristics of magnetospheric ELF/VLF banded chorus emissions, Ph.D. thesis, Stanford University.
- Haque, N., U. S. Inan, T. F. Bell, J. S. Pickett, J. G. Trotignon, and G. Facskó (2011), Cluster observations of whistler mode ducts and banded chorus, *Geophysical Research Letters*, *38*(18), L18,107, doi:10.1029/2011GL049112.
- Helliwell, R. A. (1965), *Whistlers and related ionospheric phenomena*, Stanford University Press.
- Horne, R. B., R. M. Thorne, Y. Y. Shprits, N. P. Meredith, S. A. Glauert, A. J. Smith, S. G. Kanekal, D. N. Baker, M. J. Engebretson, J. L. Posch, M. Spasojevic, U. S. Inan, J. S. Pickett, and P. M. E. Decreau (2005), Wave acceleration of electrons in the Van Allen radiation belts, *Nature*, *437*(7056), 227–230, doi:10.1038/nature03939.
- International Telecommunication Union (2008), Nomenclature, *Radio Regulations*, *1*(2).
- Jones, D. (1982), Plasma waves in the Earth’s magnetosphere, *Advances in Space Research*, *2*(1), 25–31, doi:10.1016/0273-1177(82)90088-6.
- Karinen, A., K. Mursula, T. Ulich, and J. Manninen (2002), Does the magnetosphere behave differently on weekends?, *Annales Geophysicae*, *20*(8), 1137–1142, doi:10.5194/angeo-20-1137-2002.
- Kimura, I. (1967), On observations and theories of the VLF emissions, *Planetary and Space Science*, *15*(9), 1427–1462, doi:10.1016/0032-0633(67)90115-8.

- Maeda, K.-I., and I. Kimura (1963), Origin and mechanism of the VLF emissions, *Space Res.*, *3*, 310–323.
- Makita, K. (1979), VLF-LF hiss emissions associated with aurora, *Memoirs of National Institute of Polar Research. Series A, Aeronomy*, *16*, 1–126.
- Manninen, J. (2005), Some aspects of ELF-VLF emissions in geophysical research, Ph.D. thesis, University of Oulu.
- Manninen, J., N. G. Kleimenova, O. V. Kozyreva, and T. Turunen (2010), Pc5 geomagnetic pulsations, pulsating particle precipitation, and VLF chorus: Case study on 24 november 2006, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *115*(A8), A00F14, doi:10.1029/2009JA014837.
- Park, C. G. (1982), Whistlers, in *Handbook of atmospherics Volume II*, edited by H. Volland, chap. 2, pp. 21–77, CRC Press.
- Park, C. G., and D. L. Carpenter (1978), *Very Low Frequency Radio Waves in the Magnetosphere*, pp. 72–99, American Geophysical Union, doi:10.1029/AR029p0072.
- Piddyachiy, D., U. S. Inan, T. F. Bell, N. G. Lehtinen, and M. Parrot (2008), DEMETER observations of an intense upgoing column of ELF/VLF radiation excited by the HAARP HF heater, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *113*(A10), A10,308, doi:10.1029/2008JA013208.
- Preece, W. H. (1894), Earth currents, *Nature*, *49*, 554.
- Ratcliffe, J. A. (1959), *The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere*, University Press Cambridge.
- Smith, E. J., and B. T. Tsurutani (1976), magnetosheath lion roars, *Journal of Geophysical Research*, *81*(13), 2261–2266, doi:10.1029/JA081i013p02261.
- Storey, L. R. O. (1953), An investigation of whistling atmospherics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *246*(908), 113–141, doi:10.1098/rsta.1953.0011.
- Tagirov, V. R., V. S. Ismagilov, E. E. Titova, A. M. Perlikov, V. A. Arin, J. Manninen, T. Turunen, and K. Kaila (1999), Auroral pulsations and accompanying VLF emissions, *Annales Geophysicae*, *17*, 66–78.
- Tanaka, Y., M. Hayakawa, and M. Nishino (1976), Study of auroral VLF hiss observed at Syowa station, Antarctica, *Memoirs of National Institute of Polar Research. Series A, Aeronomy*, *13*, 1–58.

- Walker, A. D. M. (1976), The theory of whistler propagation, *Reviews of Geophysics*, 14(4), 629–638, doi:10.1029/RG014i004p00629.
- Walt, M. (1994), *Introduction to geomagnetically trapped radiation*, Cambridge University Press.
- Wood, T. G., and U. S. Inan (2002), Long-range tracking of thunderstorms using sferic measurements, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D21), 4553, doi: 10.1029/2001JD002008.
- Yearby, K. H. (1982), Magnetospheric VLF line radiation, Ph.D. thesis, University of Sheffield.