

VLF-AALLOT JA MAGNEETTiset Häiriöt

LISENSIAATINTUTKIELMA
Oulun yliopisto, fysiikaalisten tieteiden laitos
Jyrki Manninen
1995

ALKUSANAT

Sodankylän Geofysiikan observatoriossa vuonna 1987 aloitettu suomalais-neuvostoliittolainen Aktivnyij-satelliittiprojekti herätti henkiin suomalaisen VLF-tutkimuksen. Onhan kyseisiä aaltoja toki tutkittu 1970-luvulla Oulun yliopistossa sekä sähkötekniikan osastolla että tähtitieteen laitoksella, mutta jostain syystä tutkimukset loppuivat 1980-luvulle tullessa. Aktivnyij-projektikaan ei päässyt täysin tavoitteeseensa, eli keinotekoisten VLF-signaalien tuottamiseen, satelliitissa olleen vian vuoksi. Koska maapintalaitteisto on kuitenkin täysin käyttökelpoinen luonnon omien VLF-ilmiöiden tutkimiseen, painopisteitä siirrettiin niihin.

Tutkielmani aihepiiriksi muotoutui vähitellen VLF-aaltojen ja magneettisten häirioiden (pulsaatiot ja äkilliset impulssit) väliset yhteydet. Aihetta on tutkittu maailmalla kohdalaisen paljon, mutta vain tietyiltä osin. Esimerkiksi VLF-aaltojen ja korkeataajuisten ($\sim 1 \text{ Hz}$) magneettisten pulsaatioiden vaikutukset toisiinsa ovat jääneet muiden tutkimusten varjoon. Tässä tutkimuksessa olen pyrkinyt tuomaan esille vuosina 1989-1993 Pohjois-Suomen alueella rekisteröityjä SSC:hen, SI:hin ja pulsaatioihin liittyviä VLF-ilmiöitä ja samalla esittämään muualla maailmassa tehtyjä havaintoja. Teoriaosassa esittelen perusteorian sekä siihen liittyviä yksityiskohtia. Olen pyrkinyt esittämään VLF-aaltojen, tai oikeammin vihellysmoodin aaltojen, syntymekanismeja sekä aaltohiukkasvuorovaikutuksen energianvaihtoon liittyviä tekijöitä. Pidin tärkeänä, että kyseiset seikat tulevat esille tässä työssä, sillä aikaisemmat opinnäytetyöt eivät käsittele niitä yhtä laajasti.

Aineisto on täydentynyt koko tutkielman tekaojan ja aina tuntui siltä, että myös uusimman tuloksen on mahduttava mukaan. Ja ilmeisesti on mahtunutkin, kuten tutkielman sivumääristä voi päätellä. Toisinaan työ on ollut uuvuttavaa, mutta myös antoisaa. Kaikesta huolimatta tämän tutkielman tekemiseen liittyy paljon hauskoja muistoja ja tarinoita.

Tutkielmani olen tehnyt lähes kokonaan Suomen Akatemian rahoittamana (tutkijakoulutusraha). Varsinaisenä projektinimikkeenä on ollut *Maan magnetosfääriissä etenevien VLF-aaltojen ja erogeettisten elektronien vuorovaikutus* (hankenumero 3504). Projektiin rahoituksesta lausun parhaimmat kiitokseni Suomen Akatemiaalle. Työtäni ovat uutterasti ohjanneet apul. prof. Jorma Kangas ja dos. Tauno Turunen, mistä heille kuuluu parhaimmat kiitokseni. Kiitän myös tutkielmani tarkastajaa dos. Tuomo Nygréninä hyödyllisistä kommenteista.

Ilman FK Johannes Kultiman loppumatonta avuliaisuutta ja omalaatuista huumoria ei varsinaisia mittauksia olisi saatu ilmeisesti tehtyä lainkaan. Hänen asiantuntemuk-

sensa magneettisen aineiston käsittelyssä on lisäksi ollut kullanarvoista. Kiitän myös FK Antti Oikarista osallistumisesta mittauskampanjoihin ja avustamisesta VLF-aineiston käsittelyssä, dos. Tilman Bösingeriä ja FK Ritva Kuulaa avusta magneettisten pulsaatioiden käsittelyssä, dos. Kalevi Mursulaa erilaisista neuvoista, FK Juha Pirttilää tietokoneisiin ja ohjelointiin liittyvistä neuvoista ja FK Timo Turusta VLF-mittaustarvikkeista ja analyysiohjelmista. Kiitokset kuuluvat niinkään kaikille mittauskampanjoissa olleille. Kiitän Leena Kalliopuskaa ja Pirkko Kanasta avusta aineiston hankinnassa ja kannustuksesta.

Fysikaalisten tieteiden laitoksen työpaja on osallistunut merkittävällä panoksella VLF-mittaustarvikkeiden rakentamiseen ja kampanjoissa tarvittavien käytännöllisten apuvälineiden valmistamiseen, josta heille kiitokset.

Vähättelemättä mitenkään fysikaalisten tieteiden laitosta erityiskiitokset kuuluvat Sodankylän Tähtelässä sijaitsevan Suomalaisen Tiedeakatemian Geofysiikan observatoriolle. Observatorion koko henkilökunta ansaitsee suurkiitokset siitä tuesta, jonka se on pyytetystömästi ja vaivojaan säästelemättä minulle suonut. Kiitän varsinkin Maisa Kultimaa avusta aineiston hankinnassa, kannustuksesta ja työintoa parantavista herkullisista karjalaniirakoista. Observatoriolle osoitettaviin kiitoksiin laskettakoon myös työasioiden ulkopuoliset seikat, unohtamatta observatorion tärkeintä osaa – ravintola Niestaa.

Oulussa, toukokuussa 1995

Jyrki Manninen

SISÄLTÖ

ALKUSANAT

0. SYMBOLILUETTELO	4
1. JOHDANTO	7
1.1 Emissiotutkimuksen taustaa	7
1.2 VLF-emissiotyyppit	8
1.3 Emissioiden piirteitä	11
1.4 Magneettiset pulsaatiot ja häiriöt	14
2. MITTAUS- JA ANALYSOINTILAITTEISTO . . .	17
2.1 Mittauslaitteisto	17
2.1.1 VLF-antennit ja vahvistimet	17
2.1.2 Pulsaatiomagnetometri	20
2.1.3 Optiset laitteet	21
2.2 Rekisteröintilaitteisto	22
2.3 Analysointilaitteisto	24
3. VLF-AALLOT JA MAGNEETTiset HÄIRIÖT	27
3.1 Yhteydet magneettiseen impulssiin	28
3.1.1 Mittaustuloksia Suomesta ja lähialueilta	29
3.2 Yhteydet magneettisiin pulsaatioihin	38
3.2.1 VLF ja P_c 3–4-pulsaatiot	38
3.2.2 Mittaustuloksia Suomesta ja lähialueilta	39
3.2.3 VLF ja P_c 1-pulsaatiot	40
3.2.4 Mittaustuloksia Suomesta ja lähialueilta	42
3.3 Vihellykset ja revontulialimyrsky	47
3.4 Ihmisen vaikutukset VLF-aaltoihin	49
3.4.1 Verkkoharmoniset (PLHR)	49
3.4.2 Radiolähetykset	50
3.4.3 Tutkalähetteet ja muut keinotekoiset signaalit .	52
3.5 Yhteenveto havainnoista	53

4. VLF-EMISSIONIEN TEORIAA	54
4.1 Etenemismoodit	54
4.1.1 Appleton-Hartreen yhtälö	55
4.2 Vihellysmoodin eteneminen plasmassa	57
4.2.1 Yleinen tapaus	57
4.2.2 Kvasi-longitudinaalinen (QL) approksimaatio	60
4.3 Aalto-hiukkasvuorovaikutus	61
4.3.1 Yleistä	61
4.3.2 Pitkittäinen resonanssi	63
4.3.3 Poikittainen resonanssi	63
4.3.4 Anisotropia	64
4.3.5 Diffuusio	65
4.3.6 Hiukkasen energiarajat syklotronimekanismissa	66
4.3.7 Diskreettien emissioiden piirteitä	69
4.3.8 Protonisuihku ja vihellysmoodi	72
4.4 SI- ja SSC-pulsseihin liittyvä kuoro	74
4.5 Pc 1-4-aaltoihin liittyvien VLF-ilmiöiden synty	75
4.6 Suhinan teoriaa	80
4.6.1 Suhinan lähteet	80
4.6.2 Vihellys suhinan lähteenä	81
4.7 Yhteenveton teorioista ja niiden merkityksestä	83
5. TULEVAISUUDEN SUUNNITELMIA	86
5.1 Avaruusfysiikan tutkimus	86
5.2 Maaperän tutkimus	87
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	88
LIITTEET	91
A Laitteiden kytkentäkaavioita	92
A1 VLF-etuvahvistin	92
A2 VLF-päävahvistin	93
A3 Pulsatiomagnetometri	94
B Julkaisujen käsikirjoitukset	95
B1 Yahnin et al. (1995)	95
B2 Manninen et al. (1995)	116
B3 Manninen et al. (1994)	129
B4 Manninen and Turunen (1993)	135
LÄHDELUETTELO	140

0. SYMBOLILUETTELO

- a* johdinsilmukan säde
- A* anisotropia
- A_c* kriittinen anisotropia
- B, **B** magneettivuon tiheys
- B₀* magneettivuon tiheys maanpinnalla
- B_w* aallon magneettivuon tiheys
- c valon nopeus tyhjiössä = $2,9979 \times 10^8$ m/s, ala- tai yläindeksinä = cold
- D** sähkövuon tiheys
- D_α* diffuusiokerroin
- e elektroni, elektronin varaus = $1,602 \times 10^{-19}$ C
- E, **E** sähkökenttä
- ELF Extra-Low-Frequency, tyypillisesti 0,1–3 kHz
- EW East-West, käytetään ilmoittamaan vastaanottimen magneettista suuntaa
- f* taajuus = $\omega/2\pi$
- f_H* gyrotaajuus eli syklotronitaajuus = $\omega_H/2\pi$
- f_{He}* elektronin gyrotaajuus
- f_{Hi}* ionin gyrotaajuus
- f_{H0}* gyrotaajuus aallon etenemistien kaukaisimmassa pisteessä ekv.tasolla = $\omega_{H0}/2\pi$
- f_{Heq}* gyrotaajuus ekvaattoritasossa maanpinnalla = $\omega_{Heq}/2\pi$
- f_{LHR}* alempi hybriditaajuus (Lower Hybrid Resonance frequency)
- f_p, f_{pe}, f_{pi}* plasmataajuus = $\omega_p/2\pi = \sqrt{\frac{e^2 N_{e,p}}{4\pi^2 m_{e,p} \epsilon_0}}$
- F**, *F_m* voima
- GLT geografinen paikallisaika (Geographical Local Time)
- I* johdinsimukassa kulkeva virta
- J* virtatiheys
- k** aaltovektori

L L-moodi (= vasenkätisesti polaroitunut aalto)

L *L*-arvo (= etäisyys maan keskipisteestä ekvaattoritasolla maan säteinä)

m massa

m_e elektronin massa ($= 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg)

m_i ionin massa

MLT magneettinen paikallisaika (Magnetic Local Time)

n aallon taitekerroin väliaineessa

n_g ryhmätaitekerroin

N hiukkastiheys (Luvussa 2 johdinkierrosten lukumäärä)

N_e elektronitiheys

NS North-South, käytetään ilmoittamaan vastaanottimen magneettista suuntaa

p protoni

P teho

q hiukkasen varaus

R R-moodi (= oikeakätisesti polaroitunut aalto)

R_E maan säde = 6370 km

R_m etenemistien kaukaisimman pisteen etäisyys maan keskipisteestä

s matka

S ekvaattoritason ja aalto-hiukkasvuorovaikutusalueen välinen etäisyys

SI magneettinen impulssi (Sudden Impulse)

SSC magneettinen impulssi, josta alkaa magneettinen myrsky
(Storm Sudden Commencement)

t aika

T lämpötila

u protonisuihkun etenemisnopeus

v nopeus

$v_{||}$ kentän suuntainen nopeuskomponentti

v_{\perp} kentää vastaan kohtisuora nopeuskomponentti

v_a Alfvén-nopeus

v_p aallon vaihenopeus

VLF Very-Low-Frequency, tyypillisesti 3-30 kHz, mutta tässä työssä kuvaaa koko taa-juusaluetta 0,3-30 kHz

x,y,z karteesiset koordinaatit

$X \ f_p^2/f^2, = X_e + X_i$ (magnetoioninen parametri)

$X_e \ f_{pe}^2/f^2$

$X_i \ f_{pi}^2/f^2$

$Y \ f_H/f$ (magnetoioninen parametri)

$Y_e \ f_{He}/f$

$Y_i \ f_{Hi}/f$

$Y_T \ Y \sin \theta$

$Y_L \ Y \cos \theta$

W hiukkassuihkun tekemä työ

z varausluku

$Z \ \nu_e/\omega$ (magnetoioninen parametri)

α elektronin pitch-kulma $= \tan^{-1} \frac{v_\perp}{v_\parallel}$

$\alpha_{\theta,\kappa,y,z}$ elektronin pitch-kulma tiettyjen vektorisuureiden suhteen

$\beta \ v/c$

ϵ_j varauksen etumerkki

$\lambda \ f/f_H = \omega/\omega_H$

Λ magneettinen leveysaste (inv. lat.)

μ_0 tyhjiön permeabiliteetti $= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$

ω kulmataajuus $= 2\pi f$

$\omega_{Hb,e,i}$ gyrokulmataajuus $= 2\pi f_H$

ω_p plasmataajuus $= 2\pi f_p$

θ aallon etenemissuunnan ja magneettikentän välinen kulma

θ_R resonanssikulma

\perp, \parallel alaindekseinä merkitseväät kohtisuorutta ja samansuuntaisuutta magneettikentän suhteen

1. JOHDANTO

Lisensiaatintutkimuksessani käsittelemäni plasmassa etenevien ja sähkömagneettisiin aaltoihin kuuluvien ELF/VLF-emissioiden (Extra/Very-Low-Frequency, $\sim 0,1$ – 30 kHz) suhdetta magneettisiin häiriöihin, ja erikoisesti hydromagneettisiin aaltoihin. Aihepiiri on varsin laaja, joten pyrin käsittelemään enimmäkseen sellaisia ilmiöitä, joita on havaittu suomalaisissa mittauksissa. Varsinaiset mittaukset on tehty vuosina 1990–93 Pohjois-Suomessa Inarin, Sodankylän ja Enontekiön kuntien alueilla. Pääpaino tässä tutkielmassa on kokeellisten tulosten esittämisessä. Tutkielma jakautuu viiteen osaan, joissa 1) kuvataan emissiotyypit, niiden piirteitä ja niiden suhdetta magneettisiin häiriöihin (luku 1), 2) kuvataan mittaus- ja analysointilaitteisto (luku 2), käsitellään omia mittauksia ja verrataan niitä muiden tekemiin (luku 3), 4) tarkastellaan emissioiden teoriaa (luku 4), 5) esitetään mahdollisia tulevaisuuden tutkimuskohteita (luku 5). Lisäksi liitteeenä on neljä aihepiiriin liittyvää julkaisun käsikirjoitusta.

1.1 Emissiotutkimuksen taustaa

Revontuliplasman aaltojen tutkimuksella on pitkä ja mielenkiintoinen historia, joka ulottuu yli puolen vuosisadan päähen. Ensimmäinen artikkeli plasmassa etenevien sähkömagneettisten aaltojen ja revontulien sekä itse asiassa magneettisten häiriöiden välisestä yhteydestä on BURTONIN ja BROADMANIN (1933) kirjoittama. He käyttivät puhelinta ja puhelinlinjaa yksinkertaisena VLF-vastaanottimena. Tällöin he huomasivat VLF-purskeiden ja revontulipurkuksien liittyvän toisiinsa, ainakin ajoittain. Kyseessä on ilmeisesti ollut ns. revontulisuhina (auroral hiss).

Burtonin ja Broadmanin jälkeen VLF-ilmiöiden ja revontulien sekä niihin liittyvien ilmiöiden väliset yhteydet herättivät kiinnostusta vasta IGY:n (International Geophysical Year 1957) aikana. Kasvanut kiinnostus vihellyksiin ja muihin äänitaajuualueen radioilmioihin IGY:n aikana lisäsi maa-asemien VLF-laitteistoja. Näin myös revontuliin liittyvien radioemissioiden rekisteröintiin ja seurantaan avautui erinomainen mahdollisuus. Pian IGY:n jälkeen julkaistiinkin useita aihetta käsitteleviä artikkeleita (ELLIS, 1957; DUNCAN and ELLIS, 1959; MARTIN *et al.*, 1960; MOROZUMI, 1963; JØRGENSEN and UNGSTRUP, 1962; HARANG and LARSEN, 1964).

Sähkömagneettisiin aaltoihin kuuluvat emissiot ovat tyypillisesti voimakkaimpia VLF-alueella (1–20 kHz). Kuitenkin joissakin tapauksissa on tutkittu niinkin korkeita taajuuksia kuin 500 kHz (ELLIS, 1957).

ELLIS (1957) esitti ensimmäisenä revontuliplasmassa etenevien sähkömagneettisten aaltojen syntyteorian. Hän oletti, että radioemissiot syntyvät presipitoituvien varattujen hiukkasten Cerenkov-säteilystä. Tämä on edelleen yksi revontulisuhinan teorioista.

Maata kiertävien satelliittien avulla päästiin tutkimaan magnetosfäärisä eteneviä aaltoja uudesta suunnasta. Satelliittimittaukset voidaan tehdä *in situ* emissioiden syntyalueella ja toisaalta, koska ionosfäärin absorptio ei vaikuta, erilaisten kynnysarvojen tutkiminen on huomattavasti helpompaa. Ensimmäisen VLF-aaltojen satelliittimittauksia käsittelevän tutkimuksen julkaisivat GURNETT and O'BRIEN (1964). Sittemmin satelliittien käyttö VLF-tutkimuksessa on lisääntynyt huomattavasti.

VLF-taajuuksia huomattavasti korkeampia radioemissioita (≥ 80 kHz) löydettiin 1960- ja 1970-luvuilla (esimerkiksi BENEDIKTOV *et al.*, 1965; DUNCKEL *et al.*, 1970; STONE, 1973; GURNETT, 1974). Satojen kHz:ien taajuiset radioemissiot ovat GURNETTIN (1974) mukaan syntyneet hyvin korkealla revontulien yläpuolella, ja ne liittyvät diskreetteihin revontulikaariin. Hän havaitsi myös, että kokonaissäteilyteho voi nousta jopa gigawattiin. KURTH *et al.* (1975) alkoivat kutsua tätä radiosäteilyä AKR:ksi (Auroral Kilometric Radiation).

ELF-VLF-aaltojen eteneminen riippuu magneettikentän geometriasta ja plasmatiheydestä magneto- ja ionosfäärisä. ELF-VLF-emissioiden rekisteröinti maanpinnalla on suuren kiinnostuksen kohteenä magnetosfäärifysiikassa, koska havaitut emissiot tarjoavat hyödyllistä informaatiota magnetosfääri-ionosfäärikyytkennästä. Magnetosfäärin ja ionosfäärin vaikutukset voidaan erottaa toisistaan esimerkiksi samanaikaisilla mittauksilla magneettisissa konjugaattipisteissä ja satelliiteissa. Kuitenkin tilastollisten tulosten saamiseksi satelliitit liikkuvat liian nopeasti ja ovat suurimman osan ajasta kaukana maapintamittauksia tekevien asemien magneettisesta kenttäviivasta, kun niiden rekisteröintejä tarvitaisiin. Poikkeuksen muodostavat geostationäärisellä radalla olevat satelliitit, joiden eduksi voidaan laskea myös maanpinnalla sijaitseva konjugaattipiste, joka on revontulialueella, $L \sim 6$. Satelliittien hiukkas- ja magneettikenttämittaukset ovat kuitenkin hyödyllisiä, vaikka satelliitti olisikin maapinta-asemaan nähden sivussa.

1.2 VLF-emissiotyypit

HELLIWELL (1965) jakaa emissiot eri tyypeihin spektrimuodon, periodisuuden ja aiheuttajan mukaan.

I. *Suhina* (hiss)

Suhinaksi sanotaan emissiotyyppiä, joka muistuttaa kaistarajoitettua lämpökohinaa. Jos siinä ei havaita merkittäviä muutoksia minuuttien tai edes tuntien aikana, sitä kutsutaan vakaaksi suhinaksi (steady hiss). Toisinaan suhinan intensiteetissä voi tapahtua nopeita muutoksia, jolloin sitä kutsutaan impulsiiviseksi suhinaksi (impulsive hiss).

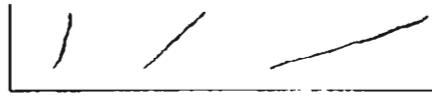
Taulukko 1.1 VLF-emissiotyypit (HELLIWELL, 1965)

I. Suhina

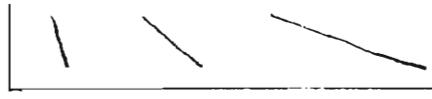


II. Diskreetit emissiot

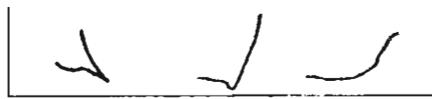
A. Nousevat



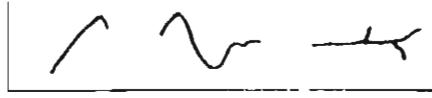
B. Laskevat



C. Koukut

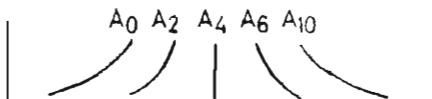


D. Yhdistelmät

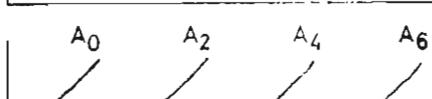


III. Periodiset emissiot

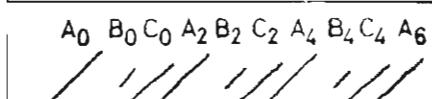
A. Dispersiiviset



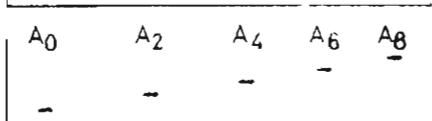
B. Ei-dispersiiviset



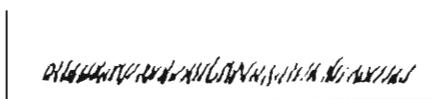
C. Monivaiheiset



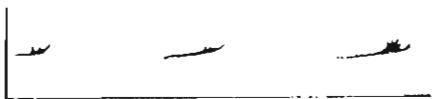
D. Ajautuvat



IV. Kuoro



V. Kvasiperiodiset emissiot



VI. Liipaistut emissiot



II. Diskreetit emissiot (discrete emissions)

Emissiot, joiden kestoaika on enintään muutamia sekunteja, ovat diskreettejä. Ne saatavat olla puhdasääniä tai sameita. Diskreettiin ryhmään kuuluvat nousevat (rising tones), laskevat (falling tones) ja koukku-tyyppiset (hooks) emissiot. Koukussa on laskeva ja nouseva osa (yleensä tässä järjestyksessä), mutta se voi muodostua myös kahdesta emissiosta, jotka yhtyvät alhaisilla taajuuksilla. Diskreetit emissiot voivat esiintyä erilaisina yhdistelminä, joiden spektrumuodot ovat moniharaisia. Jos useat diskreetit emissiot ovat liittyneet yhteen puhutaan ryhmistä tai ryppäistä (cluster).

III. Periodiset emissiot (periodical emissions)

Diskreettien emissioiden tai emissioryppäiden väli voi olla säännöllinen, jolloin puhutaan periodisista emissioista. Jakso vaihtelee yleensä kahdesta kuuteen sekuntiin, joka vastaa kahta hyppyä pallonpuoliskolta toiselle. Kyseessä on sama asia kuin vihellyskaikujen välisissä viiveissä (esim. MANNINEN, 1991). Jos jaksonpituuus muuttuu taajuuden mukaan, sanotaan emissioita dispersiivisiksi. Mikäli tästä muutosta ei havaita, kyseessä on ei-dispersiivinen emissio. Kun vähintään kaksi emissiottyyppiä, joiden jaksonpituuus on sama, esiintyy ajallisesti päällekkäin, on kyseessä monivaiheinen emissio. Vaiheiden lukumäärä on yhtä suuri kuin monivaiheisen emissioon sisältyvien emissiottyyppien lukumäärä. Taajuuskrien ei tarvitse olla samoja. Jos taajuus muuttuu huomattavasti jaksosta toiseen, sanotaan tällaisia emissioita ajautuviksi eli driftaaviksi. Taulukon 1.1 kuvioissa on isoilla kirjaimilla (A,B,C,...) merkity yksittäisiä emissioita ja alaindekseillä kuvataan hyppyjen lukumäärää.

IV. Kuoro (chorus)

Kuoroksi tai aamukuoroksi (dawn chorus) esiintymisajankohtansa mukaan kutsutaan ajallisesti hyvin lähekkäin olevia diskreettejä emissioita, joita ei voi erottaa toisistaan. Ajoitain kuoro voi muistuttaa lintuparven sirkustusta. Yleisin kuorotyyppi koostuu nousevista emissioista taajuusväillä 1–5 kHz ja emission taajuudenmuutosnopeus on keskimäärin 3 kHz/s. Kuoron yhteydessä esiintyy usein myös suhinaa.

V. Kvasi- eli näennäisperiodiset emissiot (quasi-periodic emissions)

Suhteellisen pitkäperiodisia emissiopurskeita, jotka koostuvat diskreeteistä tai periodisista emissioista tai kuorosta, kutsutaan kvasiperiodisiksi. Purskeiden väli voi olla kymmeniä sekunteja ja se vaihtelee epäsäädöllisesti, tosin kuin periodisissa emissioissa.

VI. Liipaistu eli trigattu emissio (triggered emission)

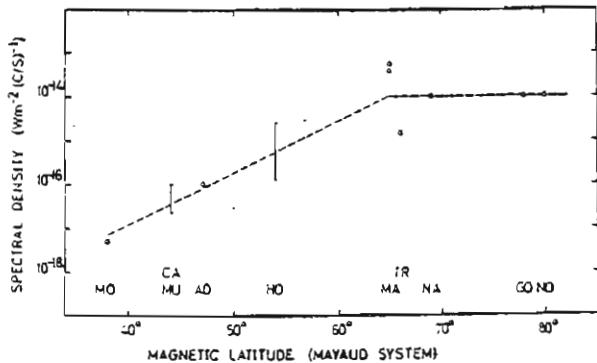
Mikä tahansa VLF-taajuusalueen ilmiö voi aiheuttaa emission siten, että sekä aiheuttaja että syntynyt signaali ovat havaittavissa. Tällöin puhutaan liipaistuista emissioista. Aiheuttajina voivat olla vihellykset, diskreetit emissiot, VLF-lähettimien signaalit ja sähkölinjojen ylivärähtely.

1.3 Emissioiden piirteitä

I. Intensiteetti

Kuoron intensiteetti on GURNETTIN (1966) ja KIMURAN (1967) mukaan luokkaa $10^{-12} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ taajuudella 1 kHz. Aallon voimakkuutta voidaan kuvata myös ns. spektritiheydellä (wave spectral density), jonka yksikkö on $\text{pT}^2\text{Hz}^{-1}$. Se on käyttökelpoisempi mitattaessa aallon magneettivuon tiheyttä. Yksiköitten välinen relaatio ympyräpolaroituunelle aallolle vapaassa tilassa (free space) on $1 \text{ pT}^2\text{Hz}^{-1} \equiv 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ (TATNALL et al., 1983). Esimerkiksi suomalaiset rekisteröinnit perustuvat aallon magneettisen komponentin mittamiseen. Tällöin havaitut maksimi-spektritiheydet ovat olleet noin $0,1 \text{ pT}^2\text{Hz}^{-1}$.

Suhinan intensiteettiä ovat tutkinneet esimerkiksi GURNETT (1966), JØRGENSEN (1966), KIMURA (1967) ja SATO et al. (1990) hyvin laajalla alueella (magneettiselta navalta keskileveyspiirille). KIMURAN (1967) mukaan suhinan intensiteetillä on maksimi (jopa $10^{-12} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) revontulialueella. Ekvaattoria kohti siirryttääessä sen intensiteetti pienenee (kuva 1.1).



Kuva 1.1 VLF-suhinan intensiteetti magneettisen leveyspiirin funktiona (revontulialueella intensiteetti kuvassa olevaa suurempia). (JØRGENSEN, 1966)

ONDOH (1963) määritti VLF-aallon absorption ionosfäärissä. Hänen mukaansa 4 kHz:n absorptio revontulialueella on 2,2 dB magneettisesti rauhallisena yönä ja 16,9 dB diffusin revontulen yhteydessä. Lisäksi osittaisheijastumisesta ionosfäärin yläosissa aiheutunutta vaimennusta ja divergenssiä ionosfäärin tunkeutumisen jälkeen ei voi jättää huomiotta. Tämän vuoksi VLF-emissioiden intensiteetti on merkittävästi suurempi ionosfäärin yläpuolella.

II. Vuorokausi- ja vuodenaikaisvaihtelu

Kuoron intensiteettimaksimin esiintyminen vaihtelee ajallisesti välillä 4–12 MLT riippuen leveysasteesta siten, että korkeilla leveysasteilla maksimi havaitaan myöhempin kuin keskileveysasteilla. YOSHIDA and HATANAKA (1962a,b) osoittivat, että magneet-

tisesti häiriöisenä aikana emissoiden intensiteettimaksimi siirtyy aikaisemmin korkeille leveysasteille. LAASPERE *et al.* (1964) havaittivat, että matalilla leveysasteilla kuoroa ei juurikaan esiinny kesällä, mutta talvella aktiivisuus on korkea. Korkeilla leveysasteilla kuoron esiintymismaksimi on puolestaan kesällä. Samaan tulokseen ovat päätyneet myös SATO *et al.* (1990) konjugaattipisteissä tehtyjen pitkääikaishavaintojen perusteella.

Vuorokauden ajasta riippuva emissoiden esiintyminen eri leveysasteilla muistuttaa ns. Störmerin positiivisten hiukkasten presipitaatiospiraalialta. Tästä ALLCOCK (1957) päätteli VLF-tutkimuksen alkuaikoina liian suoraviivaisesti emissoiden aiheutuvan auringosta peräisin olevista positiivisista hiukkasista. Päätelmä ei pidä enää paikkaansa, mutta kyseessä on kuitenkin yksi vanhimista VLF-emissioita käsittelevistä artikkeleista.

Suhinaa havaitaan yleensä ilt- ja yöaikoina, koska se liittyy usein revontuliin. Injun 3-satelliitin havaintojen perusteella suhinalla ei esiinny merkittävää vuodenaikeisia vaihtelua (GURNETT, 1966). Toisaalta taas SATO *et al.* (1990) totesivat, että havaitut piirteet eivät riipu ainoastaan MLT:sta, vaan myös GLT:sta (geografinen paikallisaika, joka liittyy geografiseen pituuspiiriin) ja vuodenajasta. He nimittäin havaittivat, että 750 Hz:n emissoiden intensiteetti maanpinnalla liittyy vahvasti auringon säteilyn aiheuttamaan elektronitiheyden kasvuun päiväpuolella.

III. *Esiintyminen konjugaattipisteissä*

Magneettisissa konjugaattipisteissä havaittuja emissioita vertailtaessa korrelaatio on yleensä erittäin hyvä. HELLIWELL (1965) esittelee useita esimerkkejä molemmilla pallonpuoliskoilla havaitusta identtisistä emissioista, joista periodiset emissiot ovat tavallisimpia.

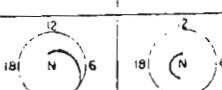
Dispersiivisten emissoiden identtisyys konjugaattipisteissä on helposti ymmärrettävissä, koska niissä havaitaan vihellyksille tyypillistä dispersiota ja kaikujonoja. Dispersio syntyy emissoiden edetessä pallonpuoliskolta toiselle. Ei-dispersiiviset emissiot ovat spektrumuodoiltaan sellaisia, että niiden on täytynyt syntyä lähellä maata. Tällöin ne eivät ole voineet edetä pallonpuoliskolta toiselle ennen maanpinnalla havaitsemista, vaikka purskeiden väli onkin lähellä kahden hypyn vihellyksen viivettä. Toisaalta itse emissoiden lähde voi liikkua edestakaisin pallonpuoliskojen välillä, mikä selittäisi purskeiden välin. HELLIWELL (1965) ei usko peilipisteiden välissä oskilloivien hiukkasten aiheuttavan emissioita vaan on sitä mieltä, että ei-dispersiiviset emissiot syntyvät muiden vihelysmoodissa etenevien aaltojen vuorovaikutuksissa.

Yöpuolella suljettujen kenttäviivojen alue päättyy magneettiselle leveyspiirille ~70-75° (esim. HULTQVIST, 1973). Tämä raja siirtyy magneettisen myrskyn aikana ekvaattoriin pään. Avoimien kenttäviivojen alueella ei pitäisi esiintyä emissioita, jotka ovat identtisiä ”konjugaattipisteessä”. Kuitenkin esimerkiksi HELLIWELL (1965) esittää tapauksia, jolloin myös korkeilla leveyspiireillä on havaittavissa konjugaattipisteiden välistä korrelaatiota. Tämä voidaan tällä hetkellä selittää vain sillä, että emissiot voivat edetä maionosfääriaaltoputkessa alemmilta leveyspiireiltä.

Konjugaattipisteissä tehdyt samanaikaiset rekisteröinnit tarjoavat mahdollisuuden erottaa VLF-aaltojen syntyn ja etenemiseen liittyvät magnetosfääriset ja ionosfääriset vaikutukset toisistaan. Konjugaattipisteissä havaintojen väliset eroavaisuudet johtuvat osaltaan mittausalueiden erilaisesta asemasta aurinkotuulen suhteeseen. Myös pallonpuoliskojen vuodenaikaero aiheuttaa poikkeavuuksia havaintoihin. Lisäksi auringon nousu- ja laskuaikojen ero saattaa olla suurikin riippuen siitä, miten paljon konjugaattipisteiden geograafiset pituuspiirit poikkeavat toisistaan.

IV. Kuoron ja suhinan karakteristiset erot

Kuoron ja suhinan tehotiheyksissä ei ole havaittu huomattavia eroja satelliitti- ja maapintamittausten välillä. Maksimi-intensiteetti ionosfäärisissä on $\sim 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1/2}$.

	CHORUS	HISS
POWER SPECTRAL DENSITY	$10^{-12} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1/2}$	10^{-12}
MOST ACTIVE TIME	DAY	NIGHT
DIURNAL VARIATION (SPIRAL)		
LATITUDE	RELATIVELY LOW	RELATIVELY HIGH
WITH AURORA	NO	WEAK
IONOSPHERIC ABSORPTION	HIGH	NO
LOW ENERGY PARTICLES	$\sim 40 \text{ keV}$	10 keV OR LESS
MAGNETOSPHERIC TAIL	NO	PROBABLY HIGH

Taulukko 1.2 Kuoron ja suhinan karakteristiset erot KIMURAN (1967) mukaan.

Ajallinen esiintymismaksimi sekä suhinalla että kuorolla eri geomagneettisilla leveyspiireillä noudattaa lähes symmetristä spiraalia. Kuoron esiintymisspiraali on hyvin samalainen kuin positiivisesti varattujen hiukkasten presipitaatiospiraali. Vastaavasti suhinan esiintyminen on yhtenevä negatiivisesti varattujen hiukkasten tai elektronien presipitaatiospiraalin kanssa.

KIMURAN (1967) mukaan suhina liittyy revontuliin useammin kuin kuoro, mutta suhinaakaan ei aina havaita revontulien kanssa. Toisaalta magneettisen keskiön jälkeen kuoro liittyy hyvin usein revontulipulsaatioihin.

Ionosfäärin absorptio korreloii esimerkiksi KIMURAN (1967) mukaan hyvin kuoron mutta ei suhinan kanssa. Hänen tutkimansa Injun-3 satelliitin rekisteröimä aineisto liittää 10 keV elektronivuon suhinaan ja 40 keV elektronivuon kuoroon. Toisin sanoen suhina esiintyy

korkeammilla leveyspiireillä kuin 40 keV sieppausalueen raja, kun taas kuoro esiintyy tämän rajan sisäpuolella.

VLF-kuoron ja -suhinan merkittävimmät erot on koottu taulukkoon 1.2. Taulukkoon ei kuitenkaan pidä luottaa liikaa, sillä tässäkin työssä esitetään tapauksia, joiden kohdalla kuoron ja suhan erot hämärtyvät.

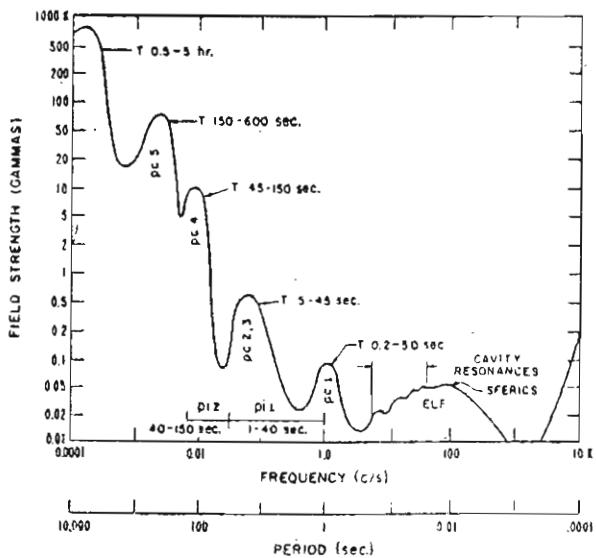
1.4 Magneettiset pulsaatiot ja häiriöt

Koska tutkielman massassa käsittelemä VLF-aaltojen suhdetta magneettisiin pulsaatioihin ja äkilisoihin magneettisiin häiriöihin, esittelen lyhyesti joitakin magneettisia ilmiöitä. Tässä kapitaleessa mainitaan vain sellaiset magneettiset häiriötyypit, joilla on yhteys VLF-aaltoihin.

Hydromagneettisten aaltojen vaikutus VLF-aaltoihin näkyy pääasiassa tekijänä, joka moduloi sekä VLF-aaltojen intensiteettiä että taajuuskäytäytymistä. Intensiteettimodulaatio on selvimmin havaittava vuorovaikutuksen seuraus, mutta se ei liity kaikkiin tapauksiin. Joissakin havainnoissa vuorovaikutuksen osoittaminen vaati syvälliempää analysointia, kuten luvussa 3 on esitetty.

I. Magneettiset pulsaatiot (magnetic pulsations)

Magneettiset pulsaatiot jaetaan yleensä kahteen päätyyppiin: säännöllisiin (continuous) ja epäsäännöllisiin (irregular). CAMPBELL (1966) on jaotellut pulsaatiot alaluokkiin niiden jaksonajan perusteella. Kuvassa 1.2 on esitetty magneettisten pulsaatioiden spektrijakauma taajuuden funktiona.

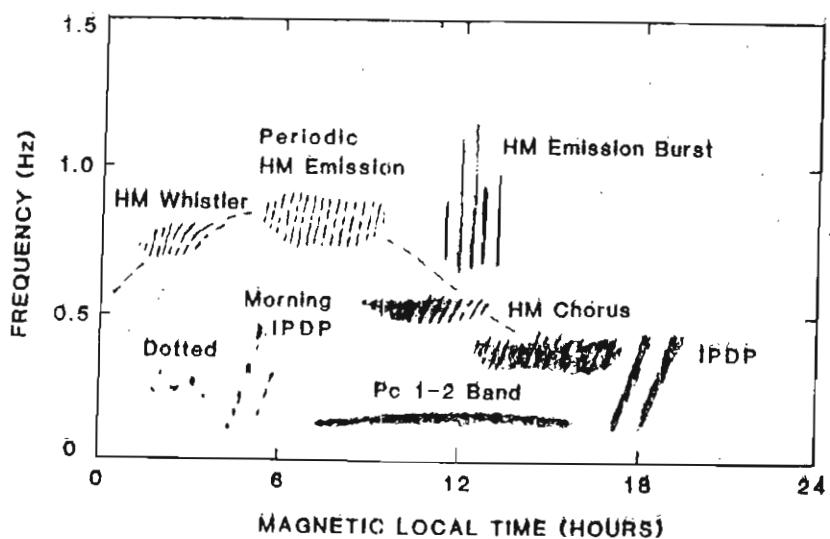


Kuva 1.2 Säännöllisten magneettisten pulsaatioiden spektrijakauma taajuuden funktiona. Kuvasta käy ilmi myös eri alaluokkien jaksonpituudet. (CAMPBELL, 1966)

Kuten kuvasta 1.2 nähdään, periodiset pulsaatiot (Pc) jaetaan viiteen (tai joskus kuuteen) alaluokkaan jaksonpituuksiensa mukaan.

Pitkäperiodisimmilla pulsaatioilla (Pc 5) aallonpituus on magnetosfäärin dimensioiden luokkaa, joten Pc 5-aallot liittyvät koko magnetosfäärin aaltoiluun. JACOBS and SINNO (1960) ja OBERTZ and RASPOPOV (1968) havaittivat, että näiden pulsaatioiden amplitudimaksimi on revontulivyöhykkeellä. Amplituditit saattavat olla useita satoja nanotesloja.

TROITSKAYA *et al.* (1971 ja 1972) ja GULELMI *et al.* (1973) havaittivat, että keskiperiodiset pulsaatiot (Pc 3–4) esiintyvät yleensä päiväpuolella. Tästä syystä niiden syntyalueena pidetään aurinkotuulta. TROITSKAYA *et al.* (1971 ja 1972) löysivät selvän relaation Pc 3–4-pulsaatioiden ja aurinkotuulen magneettivuon tiheyden välillä: $f(\text{mHz}) \sim 6B(\text{nT})$. CAO *et al.* (1994) esittävät tilastollisen tutkimuksen perusteella Pc 3-aaltojen esiintymismaksimin olevan juuri geosynkronisen radan ($L \sim 6$) ulkopuolella ja Pc4-aalloilla se on vielä kauempana. Heidän mukaansa latitudilla ei ole vaikutusta aaltojen esiintymiseen, paitsi jos kyseessä on aalto, jolla on magneettikenttää puristava komponentti. Pulsaatioiden amplitudi saattaa olla useita nanotesloja.



Kuva 1.3 Hydromagneettisten emissioiden riippuvuus magneettisesta paikallisaasta ja taajuudesta. (FUKUNISHI *et al.*, 1981)

Lyhytperiodiset pulsaatiot (tai HM-emissiot) (Pc 1–2) ovat tyypillisesti revontulialueen aaloja varsinkin auringon aktiivisuusminimien aikana (esim. MURSULA *et al.*, 1991). Pc 1-aallot syntyvät magnetosfäärissä ionisyklotronimekanismilla. Tällöin kenttäviivaa pitkin pallonpuoliskolta toiselle poukkoileva aaltopaketti saa aikaan magneettisia pulsaatioita. Aaltoniukkasvuorovaikutuksessa aallon Doppler-siirrynyt kulmataajuuus yhtyy ionin gyrotaajuuteen. Aallon taajuus tiettyllä leveysasteella liittyy ionien gyrotaajuuteen ekvaattorialueella. Periaate on sama kuin elektronien ja vihellysaaltojen resonanssissa.

Pc 1-aallot ovat matalilla ja keskileveysasteilla usein rakenteellisia (käytetään myös nimityksiä *jaksollinen* pulsaatio tai *helmi*-pulsaatio). Vastaavasti korkeilla leveysasteilla Pc1-pulsaatiot ovat enimmäkseen rakenteettomia. MURSULA *et al.* (1994) ovat tutkinneet rakenteellisia ja rakenteettomia pulsaatioita korkeilla leveysasteilla. FUKUNISHI *et al.* (1981) jakavat hydromagneettiset emissiot kahdeksaan alaluokkaan. Näistä HM-vihellykset, periodiset HM-emissiot ja HM-kuoro ovat rakenteellisia, ja HM-emissiopurskeet, IPDP, pistemäiset purskeet sekä jatkuva Pc 1–2-nauha ovat rakenteettomia. Yhteenvetona he esittävät alaluokkien riippuvuuden magneettista paikallisajasta ja taajuudesta (kuva 1.3). Spektrumuodot eivät liity vain magnetosfääriseen syntymekanismiin, vaan myös etenevistien lähdealueelta havaintopisteeseen. Pc 1–2-aaltojen amplitudi saattaa olla 0,01–1 nT ja joskus jopa enemmänkin.

II. Äkilliset impulssit (sudden impulses)

Äkilliset suuriamplitudiset magneettiset impulssit liittyvät aurinkotuulessa tapahtuviin muutoksiin, kuten tihentymiin ja harventumiin. Tällaisen tihentymän (tai harventuman) törmätessä maapallon magnetosfääriin magneettikentän arvo muuttuu äkillisesti kymmeniä tai jopa satoja nanotesloja. (NISHIDA, 1978)

Äkilliset impulssit jaetaan kahteen päätyyppiin: ensimmäinen tyyppi on sellainen, jota seuraa voimakas magneettinen myrsky ja jota kutsutaan SSC:ksi (Storm Sudden Commencement), ja toinen tyyppi on sellainen, jota ei seuraa magneettisen aktiivisuuden kasvu (SI, Sudden Impulse). Aurinkotulen mukana etenevä tihentymä puristaa magnetosfääriä kokoon, jolloin aiheutuu maanpinnallakin havaittava magneettikentän nopea muutos. Tämä pulssi on havaittavissa kaikkialla maapallolla noin minuutin kuluessa aurinkotuulessa esiintyvän rintaman törmäämisestä magnetosfääriin. Otollisin syntyalue on havaintojen (esim. ARAKI, 1977) mukaan paikallisen iltapäivän sektori.

SSC:n jälkeen magnetosfääri voi jäädä puristuneeseen tilaan (compression) jopa tunnin ajaksi. Puristumisen laukeaminen (decompression) havaitaan SI-tyyppisenä pulssina. Magneettisen myrskyn loppuvaiheessa esiintyy usein myös Pc 1-pulsaatioita. Voimakkaimmillaan ne ovat varsinaisen myrskyn jälkeen tapahtuvan magnetosfäärin puristumisen yhteydessä, jolloin uusia erogeettisiä ionuja tulee aalto-hiukkasvuorovaikutusalueelle (esimerkiksi ERLANDSON *et al.*, 1994). Samanlaisia havaintoja liittyy Pohjois-Suomessakin rekisteröityihin SSC- ja SI-tapauksiin (esim. KANGAS *et al.*, 1984).

2. MITTAUS- JA ANALYSointilaitteisto

VLF-aaltojen mittauslaitteistot kehittyivät aimo harppauksen eteenpäin IGY:n aikana ja tuolloin määriteltiin yhtäläinen standardi vastaanottimille. Antennit olivat kolmiomallisia magneettisia silmukoita, joiden korkeus oli 10 m ja leveys 20 m. Antenni muodostui yhdestä tai kahdesta kierroksesta koaksiaalikaapelia, joiden keskijohdin oli liitetty toisesta päästään vaippaan. Tällöin antennin kierrospinta-ala on ollut 200 m² tai 400 m².

Sama perusperiaate on ollut pohjana rakennettaessa suomalaisia laitteita 1980-luvun lopulla, mutta esimerkiksi sähköstaattiseen suojaukseen on kiinnitetty paljon enemmän huomiota. Muodoksi valittiin neliö, koska se on lähempiä ideaalista mallia (ympyrä), ja kierrosmäärää lisäämällä pystytiin pitämään toisaalta antennin koko pienenä ja toisaalta kierrospinta-ala riittävän suurena. Kuitenkin kyseessä on kompromissi, sillä ideaalisen antennin käyttö mittauksissa olisi hyvin hankalaa.

VLF-vastaanottimet rakennettiin Sodankylän Geofysiikan Observatoriossa vuosina 1987–1989 (TURUNEN, 1989). Laitteistoa piti suunnitelman mukaan käyttää Aktivnyij-satelliittiprojektiin yhteydessä, mutta satelliitin VLF-lähettilämen rikkoontumisen vuoksi siirryttiin luonnon signaalien rekisteröintiin.

Aktivnyij-projektiin liittyvät vastaanottimet on suunniteltu liikuteltaviksi ja tiettyjen signaalien vastaanottamiseksi. Tämä on rajoittanut suunnitteluvapautta ja joissakin komponenttiratkaisuissa on jouduttu käyttämään teknisesti ”heikompia” osia, kuin mihin olisi ollut mahdollisuus. Toisaalta laitteistoa (ks. TURUNEN, 1989; MANNINEN, 1991) on käytetty yksiasemaisena, jolloin kaikki kuusi antennia ovat olleet käytössä.

Keskittyminen luonnon signaaleihin on mahdollistanut uuden vastaanotinjärjestelmän rakentamisen. Esimerkiksi antennien herkyyttää (vastaanotettu teho) on parannettu kerroimella ~100. Myös vahvistinten valintaan on kiinnitetty enemmän huomiota.

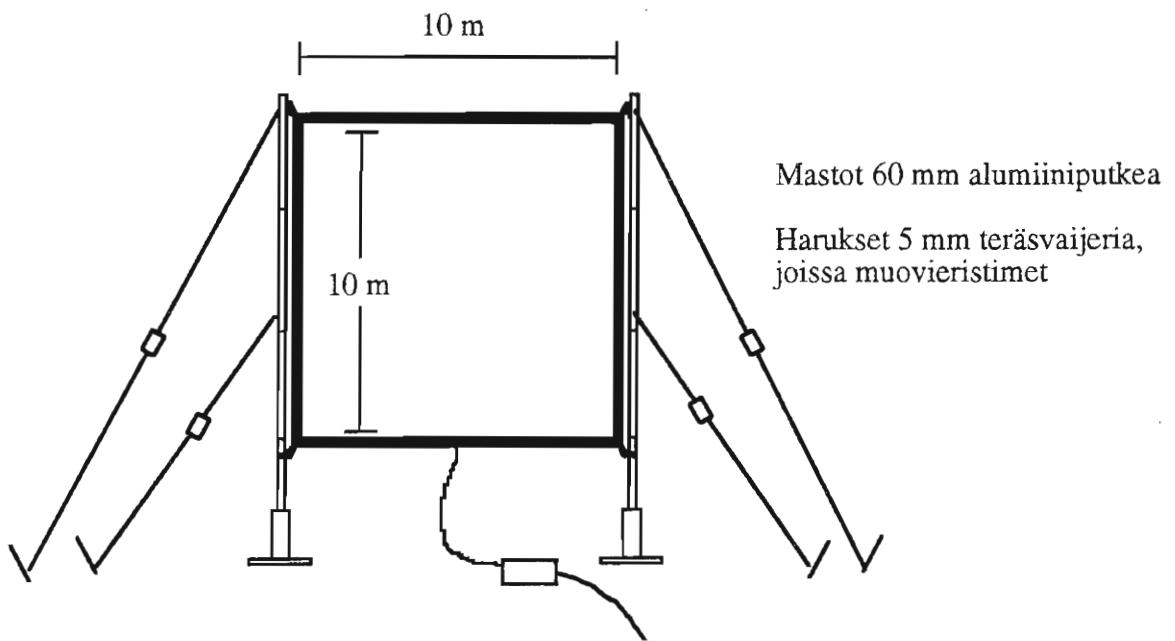
2.1 Mittauslaitteisto

2.1.1 VLF-antennit ja vahvistimet

Suurin osa mittauksista on tehty käyttäen Aktivnyij-projektiin antenni- ja vahvistinkalus-toa, joka on esitellyt yksityiskohtaisesti aiemmin (TURUNEN, 1989; MANNINEN, 1991). Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkemmin uusien antennien ja vahvistimien kuvaamiiseen. Lähes jokaisen mittauskampanjan yhteydessä laitteistoa pyritään parantamaan,

joten tässä esitetty laitteisto lienee seuraavan mittauksen yhteydessä jo hieman erilainen.

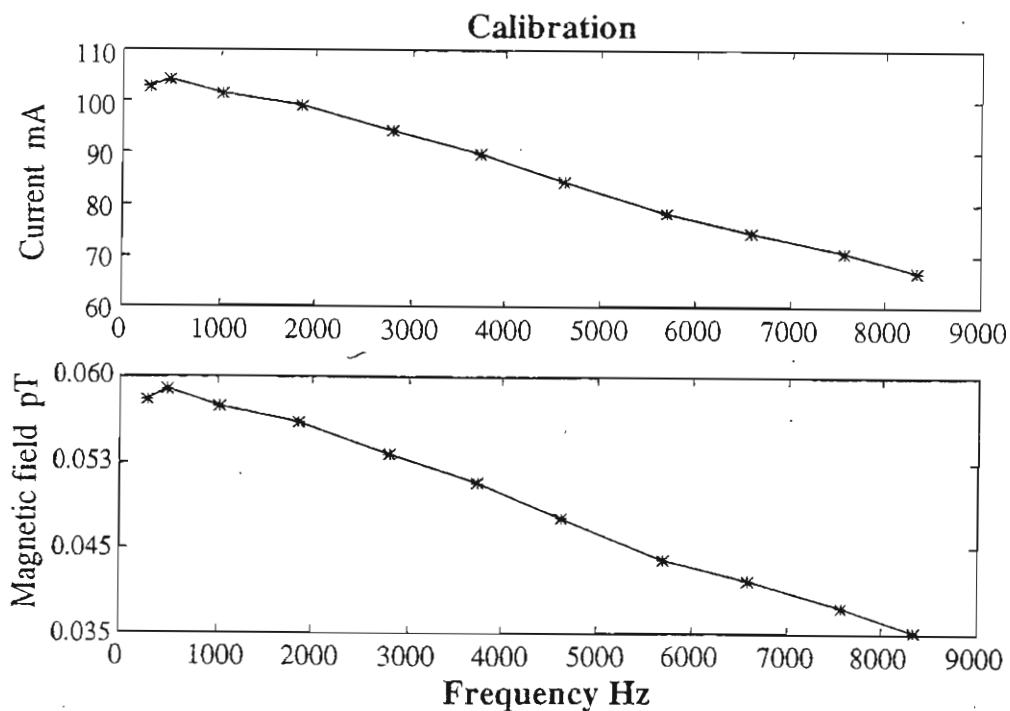
Käytetty VLF-antennien kelan langan pituus on noin 400 metriä, joka on todettu käytännössä sopivaksi. Kun antennien tehokkuutta halutaan parantaa, ratkaisevana tekijänä on kokonaiskierrospinta-ala. Aktivnyij-antennien kierrospinta-ala on 126 m^2 . Antennikaapelin 400 m:n kokonaispituudella voitaisiin rakentaa maksimissaan $100 \times 100 \text{ m}^2$ neliömallinen silmukka, jonka kierrospinta-ala olisi $10\ 000 \text{ m}^2$ (liittämällä keskijohdin vaippaan saataisiin kierrospinta-alaksi itse asiassa $20\ 000 \text{ m}^2$). Tällainen antenni olisi erittäin hankala pystyttää, joten uusien antennien rakentamisessa on päädytty kompromissiin. Antenni on $10 \times 10 \text{ m}^2$ neliömallinen silmukka, jossa on kymmenen johdinkierrostaa ja jonka kierrospinta-ala on 1000 m^2 .



Kuva 2.1 VLF-antennien rakenne.

Antennikaapeli on koaksiaalikaapelia, jonka impedanssi on 50Ω ja kapasitanssi pituusyksikköö kohti on 82 pF/m . Varsinaisen vastaanottimen käytetään pelkästään koaksiaalikaapelin keskijohdinta. Jokaisen johdinkierroksen keskikohdalla vaippa on katkaistu ja silmukan vastakkaisella sivulla vaipat on kytketty toisiinsa ja maadoitettu. Tämä estää tarpeettomien vaippakierrosten olemassaolon, mikä puolestaan liittyy sähköstaattiseen suojaukseen. Aktivnyij-antennit ovat ns. *single-ended magnetic coil*-tyyppiä, jossa signaali johdetaan johtimen toisesta päästä vahvistimen +sisääntuloon toisen pään ollessa maadoitettu. Vastaavasti uudet antennit ovat ns. *center-tapped magnetic coil*-tyyppiä, jossa signaali johdetaan johtimen molemmista päästä differentiaalivahvistimeen maadotuspisteen ollessa johtimen keskellä. Uusien VLF-antennien rakenne on esitetty kuvassa 2.1.

Vastaanottimien suotimet sisältävät kolmen 7-napaisen Cauer-tyyppisen alipäästösuoitimen ryhmän, jolla on nollakohtia kaikilla Omega-navigointijärjestelmän käyttämillä taajuuksilla (10,2 kHz, 11,3 kHz, 12,1 kHz ja 13,6 kHz) tai hyvin lähellä näitä taajuuksia. Tällä tavoin suodatetaan tehokkaasti voimakkaimmat mittauksia häiritsevät lähetteet. Häiritsevät alataajuudet on poistettu 3-napaisella elliptisellä 150 Hz:n ylipäästösuoitimella, jonka nollakohdat ovat 50 Hz ja 100 Hz. Päävahvistimessa on alipäästösuoitimet molemmissa kanaville. Etuvahvistimien signaalivahvistus on kiinteä 60 dB taajudella 500 Hz ja päävahvistimen vahvistusta voidaan säätää aina 46 dB:iin saakka samalla taajudella. Kaikkien vahvistimien virtalähteenä toimii ± 12 V:n hyytelöakku, jonka latausten väli normaalikäytössä on noin yksi viikko. Vahvistimien virrankulutus on pyritty pitämään kohtuullisena komponenttien tarkalla valinnalla ja kytkentöjen yksinkertaistamisella, joka seuraa uusimpien komponenttityyppien käyttämisestä. Tällä päästään myös kohinattomampaan tulokseen. Vahvistimet on rakentanut dos. Tauno Turunen Sodankylän Geofysiikan Observatoriossa. Vahvistimien periaatteelliset kytkennät (yksityiskohdat eivät ole julkisia) on esitetty Liitteissä A1 ja A2.



Kuva 2.2 VLF-vastaanottimen kalibraattoriin syötetty virta (yläpaneeli). Virran synnyttämä magneettivuon tiheys (alapaneeli) taajuuden funktiona 161 m:n etäisyydellä johdinsilmukan keskipisteestä.

Absoluuttisen signaalivoimakkuuden selvittämiseksi ja mittausaineiston vertailukelpoisuuden vuoksi tarvitaan kalibrointi. Kalibraattori muodostuu signaaligeneraattorista ja siihen liitetystä johdinsilmukasta, jossa on 15 kierrosta ja jonka läpimitta on yksi metri. Kun johdinsilmukassa kulkeva virta tunnetaan (tunnettu jännite tunnetun vastuksen yli),

voidaan sen aiheuttama magneettivuon tiheys laskea johdinsilmukan keskipisteen kautta kulkevalla suoralla etäisyydellä x kaavasta

$$B = \frac{N I a^2}{2(a^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (2.1)$$

missä N on johdinkierrosten määrä, I on johtimessa kulkeva virta, a on silmukan sade ja x etäisyys vastaanotinantenniin. Kalibrointitaajuutena käytetään 1 kHz:iä, koska signaalin voimakkuus käytetyllä signaaligeneraattorilla on silloin lähes maksimissaan. Muita taajuuksia ei välttämättä tarvita, sillä VLF-vastaanottimen vaste on vakio koko mittauskaistalla. Kalibraattorin signaalivoimakkuus on esitetty kuvassa 2.2.

2.1.2 Pulsatiomagnetometri

Erääät tutkittavat VLF-ilmiöt edellyttävät samanaikaista magneettisten pulsaatioiden mittoamista. Tästä syystä Sodankylän Geofysiikan Observatoriossa rakennettiin kenttäolosuhteisiin soveltuva kaksikomponenttinen induktiokelamagnetometri.

Pulsatiomagnetometrin anturit ovat μ -metallisydämiset ja niiden dimensiot ovat $25 \times 25 \times 1510$ mm. Signaali-kohinasuhteen optimoimiseksi pulsaatiomagnetometrin rakentamisessa on otettava huomioon 1) anturin antama signaali, 2) anturin ohmisen vastuksen lämpö-kohina, 3) vahvistimen otossa vallitseva kohinajännite ja -virta, 4) ulkoiset häiriöt (50 Hz, salamaniskut, paikalliset magneettiset kentät, liikkuvat rautaesineet yms.), 5) haluttu kaistaleveys, 6) vahvistimen mahdollinen saturoituminen kaistan ulkopuolisista taajuuksista ennen suodatusta ja 7) termiset fluktuaatiot eri metallien kontakteissa.

Rakennetussa laitteessa on noin 10 H kela, jonka kierrosluku on 4000. Se on varustettu keskiulosotolla ja sen ohminen osa noin 65Ω huoneenlämpötilassa. Käämitykseen on käytetty halkaisijaltaan 0,3 mm eristettyä kuparilankaa, jonka kokonaispituus on noin 500 m. Sähköstaattinen suoja on tehty $4 \times 60 \times 80$ mm alumiinipalkista, johon on työstetty 6 mm:n rako estämään oikosulkukierroksen syntymisen.

Rakennetun kelan oma resonanssitaajuus on noin 3,5 kHz. Resonanssi tuodaan 12 Hz:n taajuudelle $15 \mu\text{F}$ lisäkapasitanssilla. Tällöin resonanssissa Q-arvo on noin 6, jolla 50 Hz:n taajuudelle saadaan 24 dB:n ylimääräinen vaimennus ja myös muut häiriöt suodattuvat huomattavasti. Mittauskaistalle ($<9,0$ Hz) lisäkapasitanssi ei aiheuta havaittavaa vaikutusta, vaikka resonanssi on vain hieman vahvistimen ylärajataajuutta korkeampi. Anturi on kalibroitu alueella 60 mHz – 2 Hz, missä vaste on 6 dB/oktaavi.

Signaali tuodaan vahvistimeen differentiaalisesti käyttäen suojattua kierrettyä paria. Keskiulosotto on kytketty kelan sähköstaattiseen suojaan ja kaapelien vaippaan.

Pulsatiomagnetometrissä on kummallakin kanavalla oma vahvistin, jossa on neljä perusosaa: 1) instrumentointivahvistimen tapaan kytketty etuvahvistin, jonka jännitevahvistus

on 5000 ja jonka takaisinkytkentäryhmän vastus on alle 10Ω , 2) aktiivinen 9,0 Hz:n (tammikuuhun 1993 saakka 3,75 Hz, joka on vastuksia valitsemalla palautettavissa) ali-päästösuodin, jonka vahvistus on 1 ja joka on toteutettu käyttäen Butterworthin 5-na-paista suodinta, 3) 10 mHz yksinapainen ylipäästösuodin, 4) jälkivahvistin, jolla on ulkoisella kytkimellä valittavat vahvistusarvot 100 ja 500 ja joka sisältää myös tasajännitekomponentin nollaussäädön. Vahvistimen periaatteellinen kytikentä on esitetty Liitteessä A3. Lisäksi järjestelmään kuuluu erikoisherkkistetty vahvistin Pc 1-aaltoalueelle (0,25–9,0 Hz).

Vahvistimen kokonaisjännitevahvistukseksi voidaan valita kytkimellä joko 1 000 000 tai 5 000 000. Mitattu kokonaiskohina on noin 20 nV_{pp} kaistalla 0,1–4 Hz. Ylimääräisiä häiriöitä voivat aiheuttaa esimerkiksi anturin ja vahvistimen välinen lämpötilaero sekä tämän vaihtelu. Tämän estämiseen on pyritty huolellisilla rakennerratkaisuilla ja liitoskoh-tien vahasuojauksella.

Perusvirtalähteenä käytetään ± 12 V:n hyytelöakkua. Molempien vahvistinten yhteinen virrankulutus on 12 V:n perusjännitelähteestä noin 100 mA eli laitteen tehonkulutus on noin 1 W. Akun sijasta voidaan käyttää myös ulkoista 12–15 V:n jännitelähettää. Mikäli virta tuodaan kaukaa kaapelilla, on varottava, ettei virransyötön aiheuttama magneet-tikentä pääse kytketyymään antureihin.

Pulsaatiomagnetometrin vahvistimelta signaali tuodaan koaksiaalikaapelia (molemmat komponentit erikseen) pitkin signaalismuimeen ja piirturille. Summaimessa ULF-aalto-muoto sekoitetaan VLF-signaaliin 12 kHz:n taajuudelle. Lisäksi summaimessa on eri-koisherkkistetty vahvistin Pc 1-aaltoalueelle (0,25–9,0 Hz). Tämä Pc 1-aaltomuoto sekoite-taan 17 kHz:n taajuudelle VLF-signaaliin sekä rekisteröidään myös suoraan piirturille.

2.1.3 Optiset laitteet

VLF-mittausten yhteydessä on helmikuusta 1991 alkaen käytetty myös revontuli-TV-kameraa. Tällöin mittauksen ajoitukseen voidaan käyttää TV-kuvaan multipleksattua aikasignaalia videoajastimesta. Toisaalta näin VLF-aaltojen ja revontulien välsiä yhteyksiä voidaan tutkia huomattavasti helpommin kuin käytettäessä erillisiä rekisteröintejä. Revontulikamera on tehty fysiikan laitoksessa vuonna 1986.

TV-kamera on RCA-tyyppinen ISIT TC1040-kamera, jolla voidaan kuvata myös tähtien valossa. Herkkyysalue on välillä 370–860 nm, joka kattaa revontulien visuaalisen alueen hyvin. Lisäksi laite on varustettu suodinjärjestelmällä, jolla voidaan valita rekisteröitää-väksi tietyt revontuliemissiot (425–427,8 nm; 630,0 nm, 636,4 nm; 557,7 nm) (KAILA and TANSKANEN, 1988). VLF-mittausten yhteydessä kyseistä suodinjärjestelmää ei kuiten-kaan ole käytetty, koska yhteyksiä revontuliin haetaan kaikilla aallonpituuksilla.

Kamerassa on yleisimmin käytetty objektiivia, jolla kuvakentäksi saadaan noin $84^\circ \times 105^\circ$. Tällöin voidaan seurata noin neljäsosaa koko taivaasta.

Tammikuussa 1993 Porojärvellä käytetty TV-kamera oli lainattu PGI:n (Polar Geophysical Institute) Apatityn osastolta. Perustyyppiltään kamera on samanlainen kuin Oulussa tehtykin, mutta objektiivin kuvakenttä on koko taivas eli $180^\circ \times 180^\circ$. Lisäksi objektiivi oli liitetty suoraan fotoputkeen, jolloin kuvan kohina oli huomattavasti pienempi kuin usealla linssisysteemillä varustetussa fysiikan laitoksen kamerassa.

Ensimmäisen suomalaisvoimin toteutetun ionosfäärin kuumennuskokeen aikana marraskuussa 1993 Porojärvellä käytettiin jälleen PGI:sta lainattua TV-kameraa. Edelliseen kampanjaan verrattuna kamera oli huomattavasti herkempi (kuvaruudulta voi erottaa noin 100 tähteä) ja kamerassa oli useita käyttäjän määrättävissä olevia säätmahdollisuksia. Tämä mahdolisti hyvin heikkojenkin revontulipulsaatioiden rekisteröinnin.

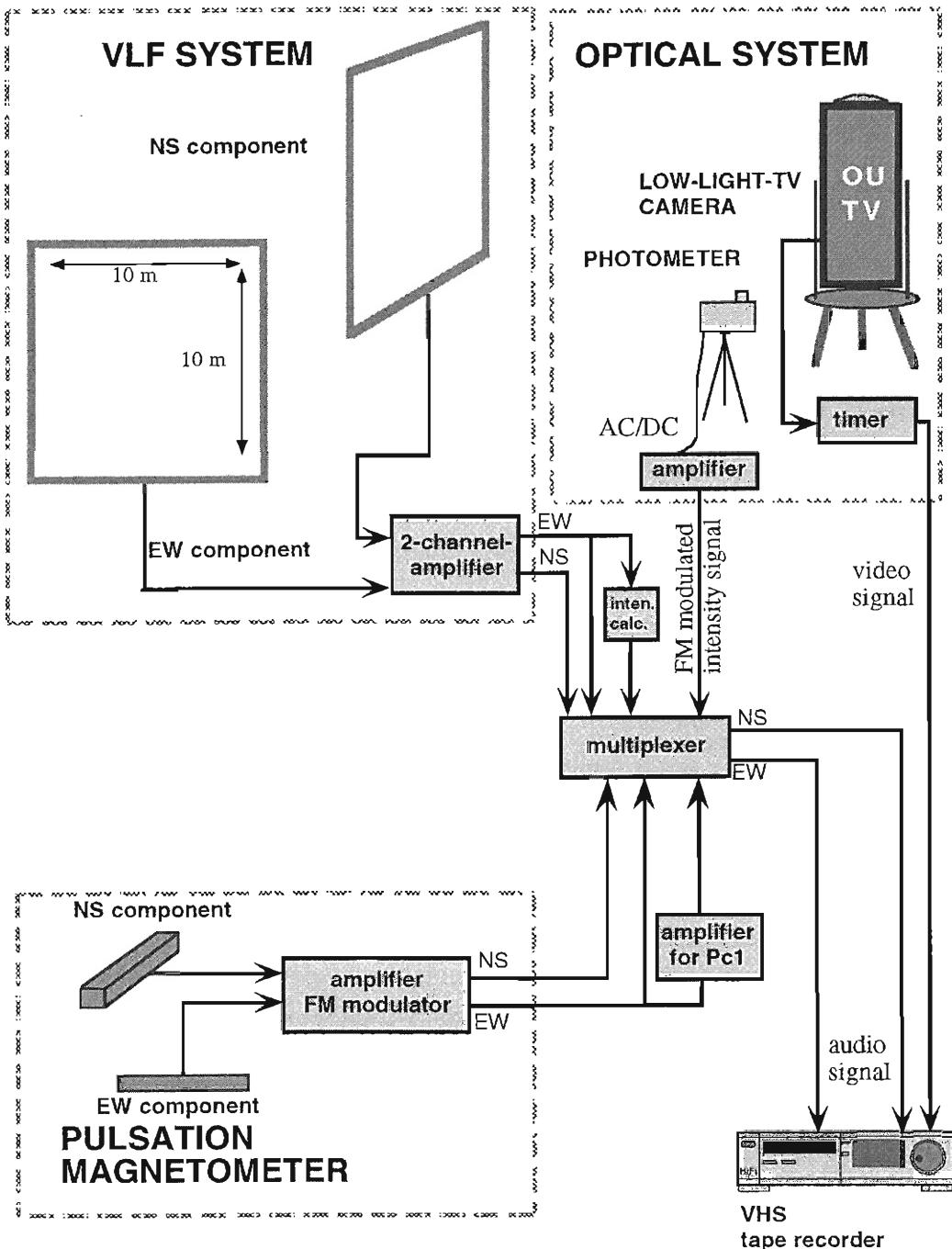
Uutena mittalaitteena helmikuusta 1992 alkaen on käytetty SGO:ssa rakennettua valodiodifotometriä. Sen keila on noin 45° (avaruuskulma) ja rekisteröitävä aallonpituuusalue on noin 450–1100 nm, eli revontuliallonpituuksista IR-alueelle. Fotometri on herkimmillään 900 nm allonpituuudelle. Vastaavasti revontuliaallonpituuudella noin 550 nm herkkyyys on puolet edellisestä. Koska valoherkkänä elementtinä toimii diodi, johon revontulivalo aiheuttaa femtoampeeriluokan virran, on signaalia vahvistettava huomattavasti ennen rekisteröintiä.

Fotometriä ei ole voitu kalibroida sen suuren keilan vuoksi. Toisaalta laite suunniteltiin VLF-emissioihin ja vihellyksiin liittyvien optisten läiskien havaitsemiseen mahdollisimman laajalta alueelta. Revontulihavainnoista menetetään tällöin absoluuttinen intensiteetti-informaatio, mutta vastaavasti havainnot eivät rajoitu jollekin tietylle emissioviivalle. Fotometrirekisteröintejä on käytetty kahdessa työssä (MANNINEN *et al.*, 1993; MANNINEN *et al.*, 1994b).

2.2 Rekisteröintilaitteisto

VLF-vahvistimelta tuleva audiosignaali, johon on summattu magneettisten pulsaatioiden aaltamuoto ja vapaasti valittavat kaksi lisäsignaalia, rekisteröidään HiFi-videoonauhurilla. Koska normaalisti mitataan vain VLF-signaalin NS- ja EW-komponentteja, voidaan tyytyä kahteen rekisteröintikanavaan. Tarkoitukseen sopivia laitteita lienee useita, mutta hinta-laatusuhteen, monikäyttöisyyden (stereoääni ja TV-kuva, normaali- ja puolinopeus), lähes CD-tasoinen laadun (audiokanavien dynaaminen ala yli 90 dB), tehonkulutuksen (~ 40 W) ja helppokäyttöisyyden vuoksi on päädytty nimenomaan VHS-videoonauhuriin. Sen audiokanavien vasteet ovat erittäin sopivia (20 Hz–20 kHz) ELF- ja VLF-taajuusalueiden rekisteröintiin. Toisaalta nauhurissa on kohtalaisen suuri kytkentäsärö, mikä saattaa heikentää signaalikohinasuhdetta varsinkin heikkojen VLF-signaalien yhteydessä.

Videonauhuria käytetään jatkuvaan rekisteröintiin, koska yhdelle videonauhalle sopii puolinopeudella rekisteröitäessä kahdeksan tunnin data ja koska stereovideonauhurissa on



VLF/ULF/Auroral instrumentation

Kuva 2.3 VLF-rekisteröintilaitteisto.

kaksi äänikanavaa. Tarkempaan, mutta lyhyeen, näytteenottoon käytetään myös Macintosh IIfx-tietokonetta. Tätä varten Sodankylän Geofysiikan Observatoriossa on rakennettu 8-kanavainen A/D-muunninyksikkö, jonka yksityiskohdat on selitetty Aktivnyij-raportissa (TURUNEN, 1989). Reaalialkaista digitaalista näytteenottoa ei ole käytetty Aktivnyij-projektiin jälkeen, koska mittauspaikoilla käytettävissä olevan sähkön määrä on rajoitettu ja toisaalta tietokonelaitteiston kuljettaminen maastoon on riskialtista.

VLF-rekisteröinti tehdään taajuusvälillä 230 Hz – 9,2 kHz. Tällöin videonauhan tyhjälle taajuusalueelle (noin 10–20 kHz) talletetaan magneettisten pulsaatioiden aaltomuoto (molemmissa kanavilla 12 kHz:n apukantoaalto) sekä kaksi seuraavista (17 kHz:n apukantoaalto): VLF-intensiteetit kaistoilta ≤ 1 kHz, 1–2 kHz ja 2–4 kHz, diodifotometrin rekisteröimä kokonaisintensiteetti (DC) ja nopeat vaihtelut (AC). Apukantoalojen taajuudet ja merkitykset ovat vaihdelleet eri kampanjoissa. Tammikuuhun 1993 saakka magneettisten pulsaatioiden aaltomuodon taltioimiseen käytettiin 7 kHz:n apukantoaltoa, koska tällöin aaltomuoto tulee ilmaistuna suoraan sonogrammiin (0–8 kHz). Tästä luovuttiin, koska VLF-rekisteröintikaistalla oleva apukantoalto häiritsee joitakin erikoistöitä.

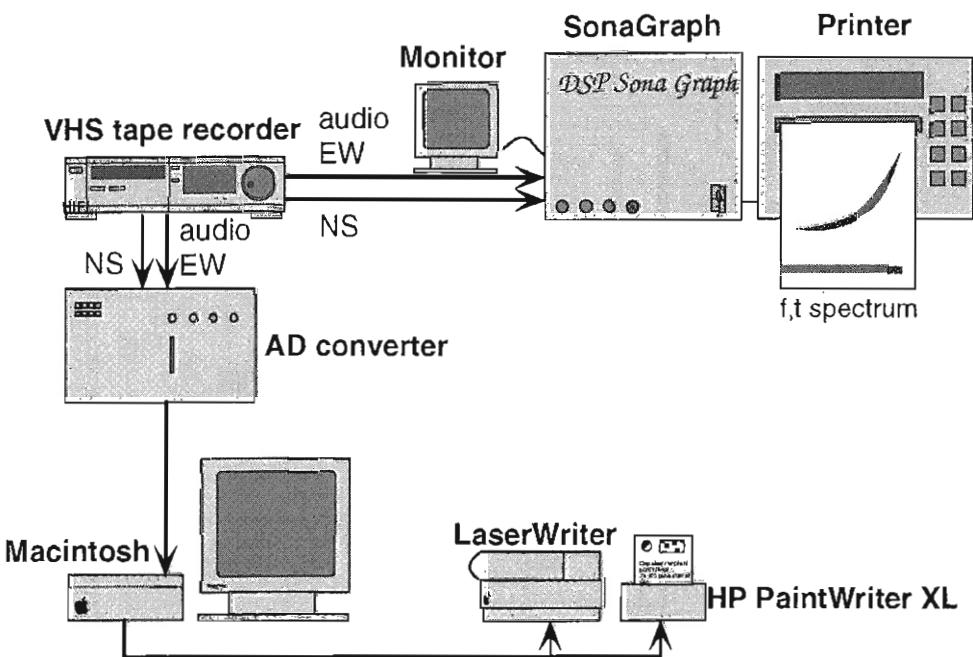
Reaalialkaista seurantaa varten tammikuussa ja marraskuussa 1993 käytetty mittausjärjestely on esitetty kuvassa 2.3. Jokainen riippumaton alijärjestelmä on erotettu katkovivalla.

2.3 Analysointilaitteisto

VLF-altojen perusanalyysi tehdään yleensä fysiikan laitoksen signaalianalyysaattorilla (*DSP Sona-Graph m5500*), jolla data voidaan analysoida reaalinopeudella videonauhalta. Laitteella voidaan tehdä 50–1024 pisteen FFT-muunnos (Fast Fourier Transform) 12-bittisesti taajuuskaistoille DC–250 Hz, DC–500 Hz, DC–1 kHz, DC–2 kHz, DC–4 kHz, DC–8 kHz (käytetyin), DC–16 kHz tai DC–32 kHz. Tämä analysaattori soveltuu erinomaisesti VLF-datan nopeaan seulontaan, mutta tarkemman analyysin tekeminen vaatii tietokonepohjaisen laitteiston. Kaaviokuva analysointilaitteistosta on esitetty kuvassa 2.4.

Kun kiinnostavat VLF-ilmiöt on löydetty signaalianalyysaattorilla, voidaan tarkempi analyysi tehdä Sodankylän Geofysiikan Observatoriossa kehitetyllä laitteistolla. Se koostuu 8-kanavaisesta A/D-muunninyksiköstä, Macintosh IIfx-tietokoneesta ja LabVIEW 2(3)-ohjelmistopaketista (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench 2). Tavallisesti digitoidaan kaksi kanavaa (EW ja NS). Näytteenottovälinä käytetään 25 μ s, koska näin saadaan koko videon äänitaajuuuskaista analysoitua. Tämä on myös käytännössä ainoa mahdollinen näytteenottoväli, sillä apukantoallot laskostuvat alemmille taajuuskil毫ille näytteenottovälin ollessa suurempi.

Digitointi tehdään tällä hetkellä vain 8 bitillä eli signaalin intensiteettiasteikko on vain 256-portainen. Se on selvästi alimitoitettu dynamiikaltaan 90 dB:n datalle. Tulevaisuu-



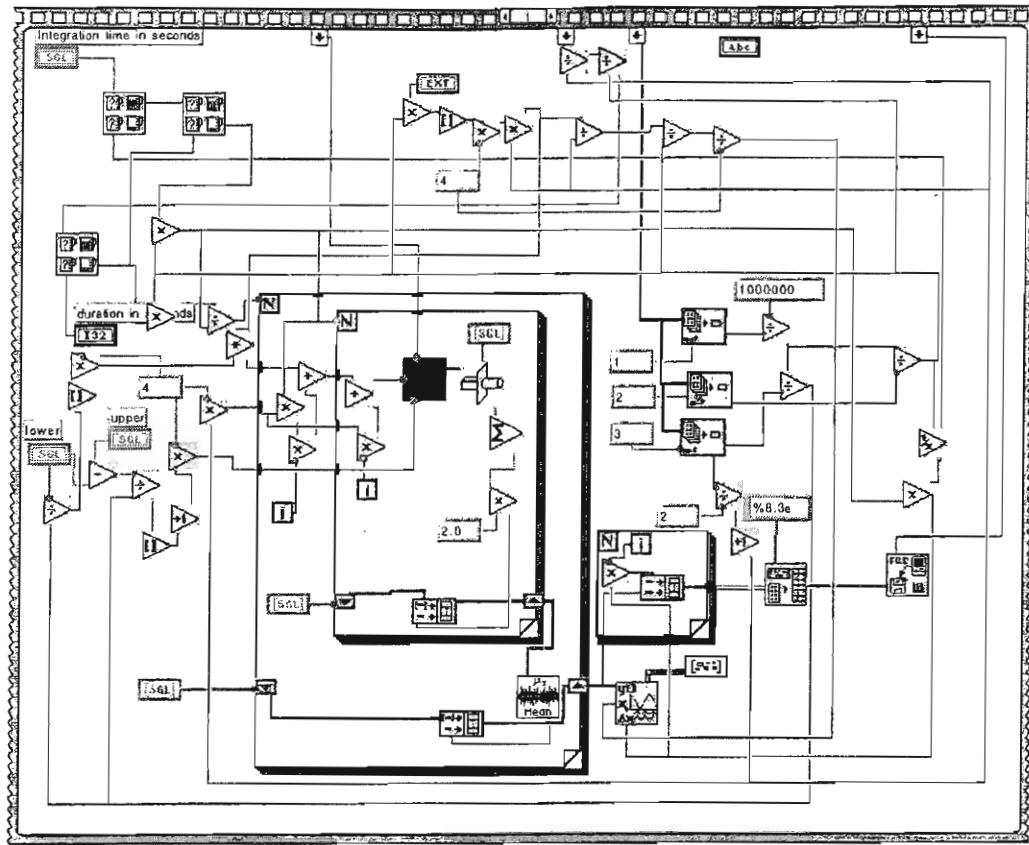
Kuva 2.4 VLF-analysointilaitteisto.

dessa laitteisto on tarkoitus muuttaa 16 bittiseksi, jolloin intensiteettiasteikosta saadaan 65536-portainen. Tästä valitettavasti seuraa datatiedostojen koon kaksinkertaistuminen, koska näyte vaatii 2 tavua entisen yhden sijaan.

Laajakaistaisen VLF-datan digitointi vaatii suuren massamuistikapasiteetin, sillä yhden sekunnin digitoinnista saadaan 40 kB:n tiedosto kanavaa kohti. Siis esimerkiksi 5 minuutin näyte vaatii 12 MB muistia raakadatana. Kun siihen tehdään Fourier-muunnos, muistitarve lähes kolminkertaistuu.

Muisti ei ole ainoa kriteeri valittaessa analysointikoneistoa – myös nopeudella on merkityksensä. Käytettäessä LabVIEW 2(3)-ohjelmistolla tehtyjä analysointiohjelmia ja Macintosh IIfx-tietokonetta vaatii 20 minuuttia pitkä data noin kaksi ja puoli tuntia koneakaa. Vastaavasti Macintosh Quadra 840AV selviytyy samasta tehtävästä noin 40 minuutissa ja IBM RISC System/6000 periaatteessa alle puolessa minuutissa.

LabVIEW 2(3)-ohjelmistopaketti on suunniteltu yksinkertaistamaan tieteellistä laskentaa, prosessien valvontaa ja käytettäväksi tieteellisten sovellustosten testauksessa ja mittauksissa. Tässä mielessä sen käyttö on perusteltua VLF-datan käsittelyssä. VLF-analyysia varten FK Timo Turunen on tehnyt LabVIEW 2-pohjaiset ohjelmat, joita käytetään Fourier-muunnokseen, tehospektrin (f, P), ristispektrin ($(f, P_1), (f, P_2)$) ja näiden välinen vaihe-ero), Fourier-muunnetun datan logaritmiseen skaalaukseen Image-ohjelmistoa varten ja tehon aikakäyttäytymisen ($t, P(f)$) laskemiseen. Viimeksi mainitussa integroitava taajuusalue voidaan valita vapaasti taajuusresoluution puitteissa. Siis käytännössä haluttu



Kuva 2.5 Esimerkkiohjelmalistaus LabVIEW-ohjelmasta, joka laskee halutun taajuusvälin tehon aikakäyttäytymisen ja tallettaa tuloksen tiedostoon. (Ohjelmat ovat FK Timo Turusen "käsialaa").

taajuuskaista voi vaihdella noin 1 Hz:stä aina 20 kHz:iin. FFT-muunnoksia tekevissä ohjelmissa käytetään Kaiser-Bessel-ikkunointia. Myös spektrien limitys voidaan määritää. Esimerkkiohjelmalistaus LabVIEW-ohjelmasta on esitetty kuvassa 2.5.

LabView-ohjelmistolla Fourier-muunnoksen koko voi vaihdella välillä 64–131072 pistettä (2:n potenssit 6–17) ja MatLab-ohjelmistolla päästään yli miljoonan pisteen muunnoksiin. Yleisin Fourier-muunnoskoko VLF-analyysissä on 4092 pistettä, jolloin taajuusresoluutio on noin 10 Hz. Tarkan aikaresoluution saavuttamiseksi on käytetty 256 pisteen muunnoksia. Verkkoharmonisia (ks. luku 3.4) tutkittaessa, jolloin tarvitaan hyvä taajuusresoluutio, on alustavasti käytetty jopa 2097152 pisteen muunnoksia.

Digitaalisesta datasta voidaan tulostaa tietokoneella haluttaessa spetrogrammi (t,f). Tällöin käytetään Image-ohjelmistoa. Signaalianalyysaattoriin tulostukseen verrattuna tietokonetulosten etuja ovat muun muassa piirrettävän kuvan pituuden (aika-akseli) vapaampi valinta ja intensiteettiskaalaksen portaaton säätmähdollisuus. Image-käsittelyn jälkeen spektrogrammi tallennetaan pict-formaattiin ja siirretään edelleen Photoshop-ohjelmistoon. Siellä voidaan tehdä lopullinen intensiteettiskaalaus joko harmaasävyinä tai värellä. Tämän jälkeen spektrogrammi tallennetaan eps- tai tiff-formaattiin ja lopullinen käsittely tekstyksineen tehdään Freehand-ohjelmistolla. Käsittely tuntuu monimutkaiselta, mutta jokaista ohjelmistoa tarvitaan hyvän lopputuloksen saamiseksi.

3. VLF-AALLOT JA MAGNEETTiset HäIRIÖT

VLF-aaltojen ja magneettisten häiriöiden riippuvuutta toisistaan on tutkittu aika ajoin ja tutkimusten väliä saattaa olla jopa yli kymmenen vuotta (MOROZUMI, 1965 ja 1966; HAYASHI *et al.*, 1968; SATO and KOKUBUN, 1981; SATO and FUKUNISHI, 1981; GAIL *et al.*, 1990b). Hiljainen kausi 1970-luvulla johtuneet satelliittimittausten mukanaan tuomista uusista ilmiöistä, jolloin kaikki tutkijat halusivat keskittyä uuteen aineistoon. Uutuuden-viehäätyksen mentyä ohi ”perinteiset” aiheet saivat jälleen huomiota osakseen. Toisaalta satelliittimittaukset toivat uutta tietoa suoraan magnetosfääristä, mikä puolestaan lisäsi aktiivisuutta myös vanhojen tutkimusten uudelleen arvointiin.

Kaikille havainnoille on yhteistä voimakkaan magneettisen pulssin tai pulsaation havaitseminen maanpinnalla ja samanaikainen VLF-aaltojen intensiteetin ja taajuuden muutos. Myös tässä tutkimuksessa esitetyt rekisteröinnit osoittavat, että nämä ilmiöt riippuvat toisistaan.

Selvin yhteys aaltojen välillä havaitaan maapallon magneettikentässä esiintyvän SSC:n (*storm sudden commencement*) ja SI:n (*sudden impulse*) aikana. Tällöin VLF-suhinan taajuus muuttuu äkillisesti. Yleensä suhan taajuus kasvaa ensin nopeasti noin kaksinkertaiseksi ja sen jälkeen suhina häviää hetkeksi kokonaan. Muutaman sekunnin kuluttua suhina ilmestyy uudelleen ja sen intensiteetti vaihtelee. Havaittavat taajuuskaistat poikkeavat usein siitä, mitä ne ovat olleet ennen magneettista pulssia. Koko ilmiö on ohi muutamassa minuutissa, ja yleensä VLF-taajuudet hiljenevät tämän jälkeen kokonaan jopa tunnin ajaksi.

Kohtalaisen hyvin havaittava yhteys ULF- ja VLF-aaltojen välillä on VLF-kuoron intensiteetin vaihtelu magneettisen pulsaation periodilla. Omien havaintojeni mukaan VLF-aaltojen intensiteetti voi vaihdella lähes kaikilla magneettisten Pc-pulsaatioiden periodilla (ks. pulsaatioiden määritelmät kappaleesta 1.4).

Yhteistä kaikille havainnoille on niiden esiintyminen lähinnä paikallisen aamupäivän ja joissakin tapauksissa myös iltapäivän sektoreilla. Huolimatta vuorokauden ympäri jatkuneista rekisteröinneistä yhtään havaintoa edellä kuvatuista yhteyksistä ei ole tehty yöllä.

Vaikka maanpinnalla havaittaisiinkin VLF-ilmiötä ilman magneettisia pulsaatioita, VLF-aaltojen taajuus- tai intensiteettimodulaatio voi kuitenkin aina olla seurausta hydromagneettisen aallon vaikutuksista VLF-aaltojen syntyalueen plasmaan. Tämän todistaminen vaatii kuitenkin alueellisesti kattavia satelliittimittauksia ja tilastollista tarkastelua.

3.1 Yhteydet magneettiseen impulssiin

MOROZUMI (1965, 1966) on tutkinut VLF-kuoron ajallisia muutoksia SSC:n ja SI:n aikana korkeilla leveyspiireillä. Hänen tulosten mukaan kuoron intensiteetti kasvaa aamupäivän SSC- tai SI-ilmiöiden aikana. Vastaavasti intensiteetti näyttää pieneneväniltapäiväsektorilla. Molempien tapauksien liittyy yleensä CNA (*Cosmic Noise Absorption*) (MOROZUMI, 1967). Satelliittihavainnot osoittavat selvästi, että ergeeettisten elektronien presipitaatioon liittyy aina kuoroemissioita (OLIVEN and GURNETT, 1968). SSC- ja SI-ilmiöiden aiheuttaman hiukkaspresipitaation ja napa-alueen kuoron (*polar chorus*) intensiteettivaihteluiden välisen yhteyksien tutkiminen on erittäin tärkeää, koska näin voidaan saada tietoa kuoron syntymekanismeista (HAYASHI *et al.*, 1968).

Vuodelta 1966 on tutkittu kaksikymmentä SSC-tapausta, joista kahteentoista liittyi muutos VLF-kuorossa (HAYASHI *et al.*, 1968). Näissä tapauksissa positiiviseen impulssiin magneettisessa *H*-komponentissa liittyi kuoron intensiteetin kasvu ja negatiiviseen impulssiin intensiteetin lasku tai häviäminen kokonaan. Jälkimmäisissä muutoksissa kuoron intensiteetti palasi ennalleen noin viisi minuuttia impulssin jälkeen. Tämä on merkittävä kuoron syntyn liittyvien energianlähteiden kannalta. Vastaavan ilmiön ovat havainneet myös esimerkiksi MOROZUMI and HELLIWELL (1966).

HAYASHI *et al.* (1968) ovat havainneet, ettei magneettisen impulssin voimakkuudella ole suoranaista yhteyttä kuoron intensiteettivaihteluun. Myöskään impulssin äkillisyys ei näytä vaikuttavan kuoron intensiteetin muutoksiin, sillä SSC:n ja SI:n lisäksi pitkäperiodiset globaalit pulssit aiheuttavat samanlaisia muutoksia. Magneettisen impulssin amplitudi ei kuitenkaan ole merkityksetön, sillä se liittyy kuoron taajuusvaihteluun. Vuoden 1966 tapausten pohjalta voidaan esittää ilmiölle kolme peruspiirrettä (HAYASHI *et al.*, 1968):

- 1) Päiväpuolella magneettinen impulssi liittyy useimpiin napa-alueen kuoron muutoksiin: positiivinen impulssi on yhteydessä äkilliseen intensiteetin kasvuun ja negatiivinen impulssi liittyy äkilliseen intensiteetin laskuun tai kuoron katoamiseen. Vastaavia yhteyksiä ei ole havaittu yöpuolella.
- 2) VLF-kuorossa muutokset alkavat noin 30 sekuntia ennen magneettista impulssia.
- 3) Taajuusmuutokset ovat lineaarisesti riippuvia impulssin voimakkuudesta.

HAYASHI *et al.* (1968) jälkeen vastaanotettu tutkimuksen, tosin huomattavasti laajemmassa aineistolla, ovat tehneet GAIL *et al.* (1990b). He ovat tutkinneet noin 250 SSC-tapausta vuosilta 1963–1985. Pääosa havaintoaineistosta on rekisteröity eteläisellä pallonpuoliskolla. Useimmissa tapauksissa laajakaistaista aineistoa on vain minuutin pituisina jaksoina, jotka on rekisteröity joko 5 tai 15 minuutin välein. Havaintoaineistosta käy ilmi, että SSC-ilmiöön liittyvät ELF-VLF-ilmiöt esiintyvät melko laajalla alueella magneettisen keskipäivän ympäristössä. Magneettisissa rekisteröinneissä SSC on havaittavissa kaikkialla maapallolla noin minuutin kuluessa ilmiön alkamisesta, mutta toistaiseksi kukaan ei ole julkaisut päiväpuolen magneettiseen impulssiin liittyviä VLF-havaintoja yöpuolelta.

Kuten GAIL *et al.* (1990b) tuloksista voidaan havaita, SSC:hen liittyvät ELF-VLF-ilmiöt ovat pääpiirteiltään tapauksesta riippumatta samantyyppisiä. Vastaavat havainnot Suomessa ovat myös kaikki päiväpuolen ilmiöitä. Toisaalta ne poikkeavat edellisistä siten, ettei niihin pääsääntöisesti liity SSC, vaan joko SI tai jättiläispulsaatio. Nämä erot vaikeuttavat magneettisten kynnysarvojen löytämistä ELF-VLF-ilmiöiden syntymiselle.

Esimerkiksi revontulialimyrskyn ei näytä liittyvän samanlaisia ELF-VLF-aaltojen taajuus- ja intensiteettimuutoksia, vaikka alimyrskyn alku onkin magneettisesti hyvin saman-tapainen SSC:n kanssa. Kuitenkin yleisesti "hyväksytty" revontulialimyrskyn liittyvä VLF-ilmiö on revontulisuhina (*auroral hiss*). Tämä antaa luonnollisesti mahdollisuuden liittää suhan synty ja alimyrskyn voimakkaat magneettiset vaihtelut toisiinsa. Tavalisesti kytkentä selitetään vain presipitoituvien elektronien emittoiman säteilyn avulla ja varsinainen magneettikentän vaihtelu jätetään huomiotta.

3.1.1 Mittaustuloksia Suomesta ja lähialueelta

Omista mittausaineistoistamme on löydetty kahdeksan tapausta, joissa VLF-havainto liittyy magneettiseen impulssiin. Tapaukset ovat aikajärjestyksessä seuraavat:

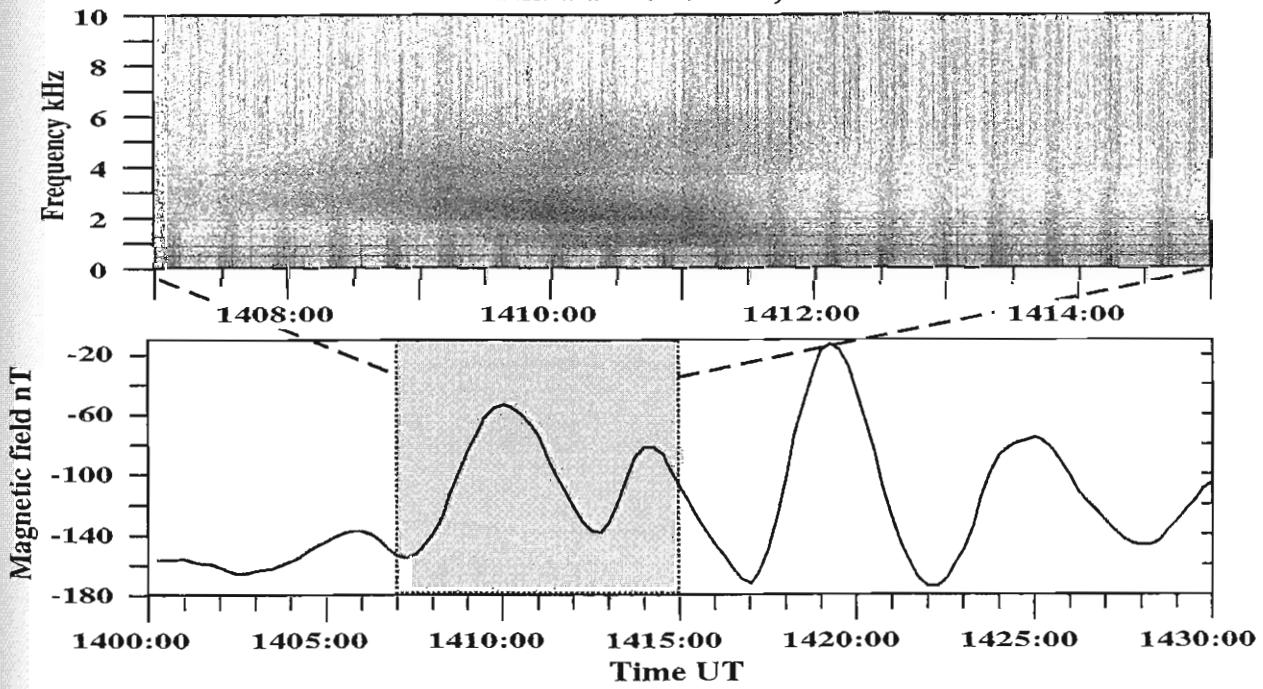
- 1) 14.03.1990 1408 UT Inarissa (INA, 65,1°N) rekisteröitiin jättiläispulsaatioon (giant pulsation) liittyvä VLF-suhina (Kuva 3.1).
- 2) 13.06.1990 1415 UT Liikkuvankankaalla (LII, 63,9°N) havaittiin magneettisen myrskyn alkuun (SSC) liittyvä suhan taajuus- ja intensiteettimuutos (Kuva 3.2).
- 3) 07.10.1991 1256 UT Pomokairassa (POM, 64,3°N) rekisteröitiin magneettiseen impulssiin (SI) liittyvä suhina ja voimakkaita verkkoharmonisia (Kuva 3.3).
- 4) 07.10.1991 1357 UT rekisteröitiin uusi magneettiseen impulssiin (SI) liittyvä suhan taajuus- ja intensiteettimuutos. Tämä tapaus on tutkituista voimakkain ja rakenteellisin (Kuva 3.4).
- 5) 19.01.1993 1022 UT Porojärvellä (POR, 66,2°N) lähellä Kilpisjärveä rekisteröitiin SSC:hen liittyvä muutos VLF-suhinassa (Kuva 3.5).
- 6) 19.01.1993 1146 UT edelliseen SSC:hen liittyvä magnetosfäärin puristuminen laukeaa ja se havaitaan magneettisena impulssina, johon liittyy erittäin voimakkaan VLF-kuoron vaimeneminen (intensiteetti laskee $1/10^5$ osaan) (Kuva 3.6).
- 7) 25.01.1993 1115 UT magneettiseen häiriöön (SI) liitti jälleen suhina, jonka taajuus ja intensiteetti vaihtelivat voimakkaasti (Kuva 3.7).
- 8) 15.11.1993 0954 UT magneettinen häiriö (SSC) aiheutti aamukuoron taajuus- ja intensiteettivaihteluja. Tapauksesta ei ole erillistä kuvaa.

Impulssien määrittely SSC:ksi tehdään pääasiassa keskileveysasteiden magnetogrammien perusteella. Tiedot SSC:n esiintymishetkistä löytyvät esimerkiksi IUGG:n kuukausittaidotteista. SI:t voidaan puolestaan kohtalaisen tarkasti määrittää SGO:ssa ja tässä kap paleessa esitetyt SI:t on määritännyt geofyysikko J. Kultima. SI:n ja SSC:n alkuperäksi tulkitaan aika, jolloin magneettivuon tiheydessä tapahtuu äkillinen muutos. Koska muu-

tos näkyy eri komponenteissa hieman eri aikoina, alkuperäinen valitaan sen komponentin mukaan, jossa ilmiö on selvimmin havaittavissa, eli ajallinen tarkkuus lienee siten noin ± 30 -60 s (keskustelut FK J. Kultiman kanssa). Määrittelyt on lisäksi tarkistettu keskileveysasteiden magnetogrammeista (esimerkiksi Intermagnet- ja USGS/NGIC-magnetogrammit CD-ROM:illa). Periaatteessa myös SSC:t voitaisiin etsiä Sodankylän datasta, mutta ilmiö ei ole korkeilla leveysasteilla täysin yksiselitteinen.

Kaikkiin edellä mainittuihin tapauksiin (1-8) liittyy äkillinen muutos suhinan taajuudessa ja intensiteetissä. Suhinassa äkillisen muutoksen alkuun liittyy usein ensin pieni intensiteetin lasku. Se on tulkittavissa hetkeksi, johon verrataan SI:n tai SSC:n alkua ja näin voidaan määrittää ilmiöiden välinen aikaero maanpinnalla. Tapauksissa, jotka alkavat ”tyhjästä”, suhinan alkuperäinen on se, jolloin ilmiö ylittää havaitsemisrajan. Kuten HAYASHI *et al.* (1968), havaitsimme VLF-suhinan muutokset maanpinnalla noin 30 sekuntia ennen magneettisia impulsseja. Koska kuitenkin impulssin ajoitustarkkuus on paljon heikompi kuin VLF-ilmiöiden, voidaan sanoa vain, että muutokset havaitaan VLF:ssä aikaisemmin. Aikaero näkyy parhaiten kuvissa 3.3 ja 3.4, joissa SI:t alkavat 1258:00 UT ja 1358:30 UT ja muutokset VLF-suhinassa alkavat \sim 1257:10 UT ja \sim 1357:50 UT. Alkuperäisen välisen viivteen havainnollistamiseksi VLF-kuvien on merkitty harvalla katkoviivalla SI:n ja SSC:n alkuperäiset ja tiheällä katkoviivalla VLF-ilmiön alkuperäiset. Monissa tapauksissa VLF-tausta oli muutoin lähes täysin hiljainen. Ensimmäistä lukuunottamatta kyseessä on sel-

Inari 14 March, 1990

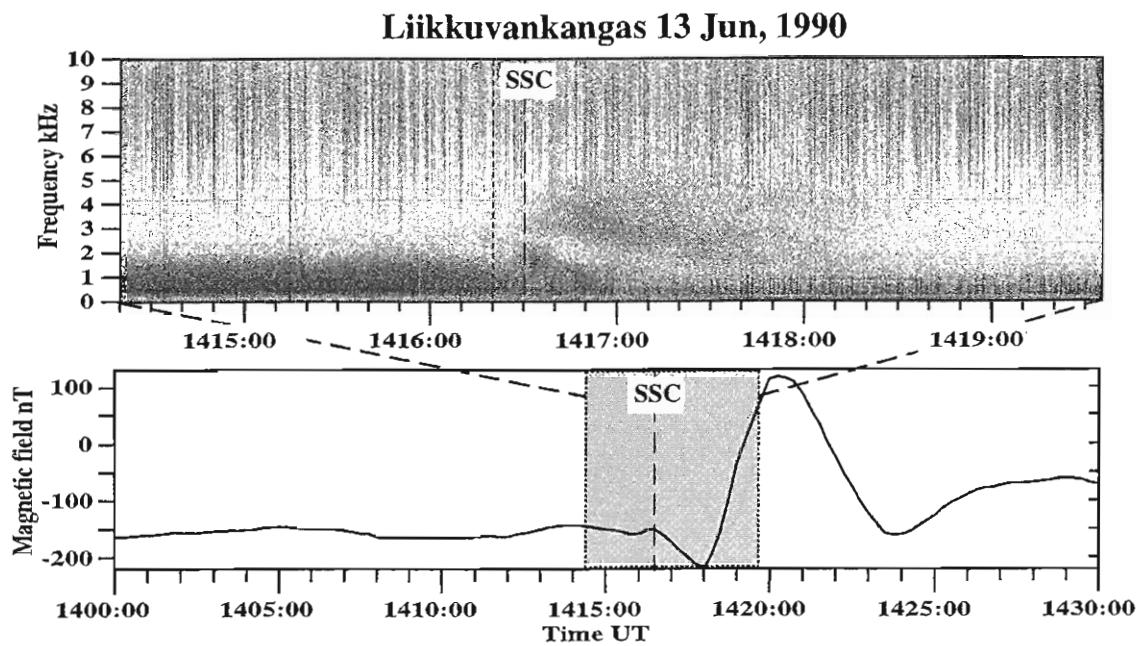


Kuva 3.1 (a) Jäättiläispulsaatioon liittyvä VLF-suhina. Rekisteröity Inarissa ($65,1^{\circ}\text{N}$) 14.03.1990 \sim 1408 UT. (b) Magneettikentän X-komponentti Sodankylässä 1400-1430 UT. Tummennettu alue liittyy suhinaan.

vä aurinkotuulen shokkirintaman törmääminen magnetosfäärin. Kaikki havaitut tapaukset esiintyvät päiväpuolella, mikä onkin luonnollista, kun ajatellaan magnetosfäärin osaa, johon shokkiaalto törmää. Suhinoiden täytyy siis ilmeisesti syntyä alueella, joka on lähellä iskurintaman törmäysmeridiaania.

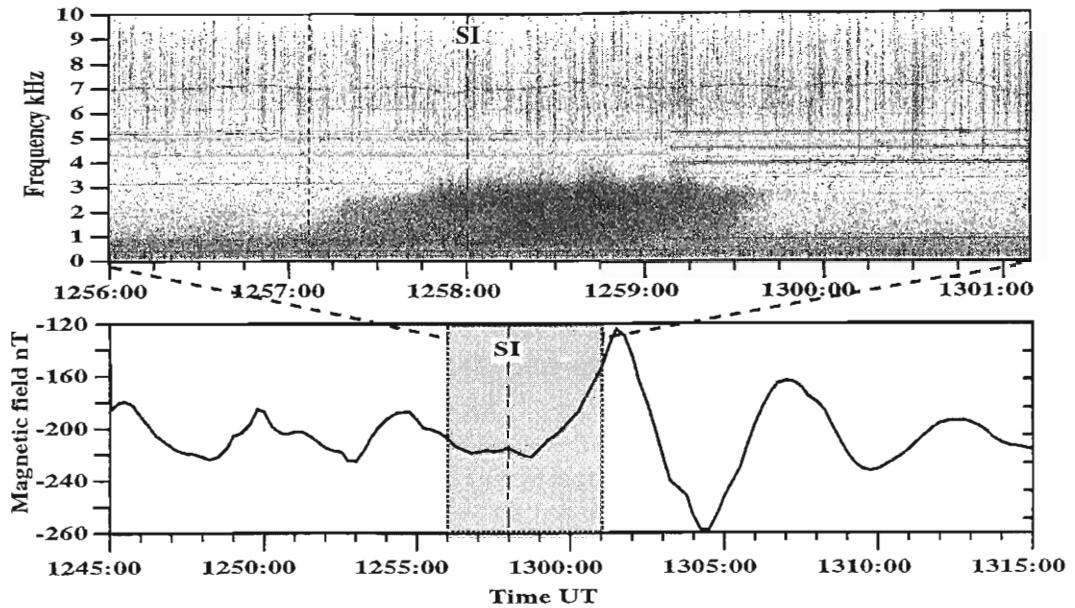
Jäättiläispulsaation ei selitetä johtuvan aurinkotuulesta, joten siihen täytyy liittyä jokin muu yhteinen piirre SI:n kanssa. Tällainen voi olla esimerkiksi pulssin amplitudi tai periodi. Sekä jäättiläispulsaation että magneettisen impulssin amplitudi on jopa useita kymmeniä nanotesloja ja kestoaika (tai periodi) sadan sekunnin luokkaa. Havainnot maanpinnalla (GAIL *et al.*, 1990b) ja satelliiteissa (GAIL and INAN, 1990) eivät pysty antamaan tyhjentävää vastausta VLF-suhinoiden käyttäytymiselle SSC-tapaiksissa. He kylläkin esittävät, että suhanan käyttäytyminen saattaa liittyä magneettikenttäviivojen resonanssiin. Tämä puolestaan on sama mekanismi, millä jäättiläispulsaation syntynä selitetään (esimerkiksi GLASSMEIER, 1980).

Suomessa rekisteröity jäättiläispulsaatioon liittyvä VLF-suhina on esitetty kuvassa 3.1. Suhinassa tapahtuvat muutokset liittyvät vain ensimmäiseen magneettiseen pulssiin, vaikka pulsaatio jatkuukin kymmeniä minuutteja. Todennäköinen selitys on se, että pulsaation aiheuttama muutos elektronien energiajakaumassa ja näin syntynyt vapaa energia VLF-aallon syntyalueella on käytetty loppuun. Siis suhina on syönyt kaiken vapaan ener-



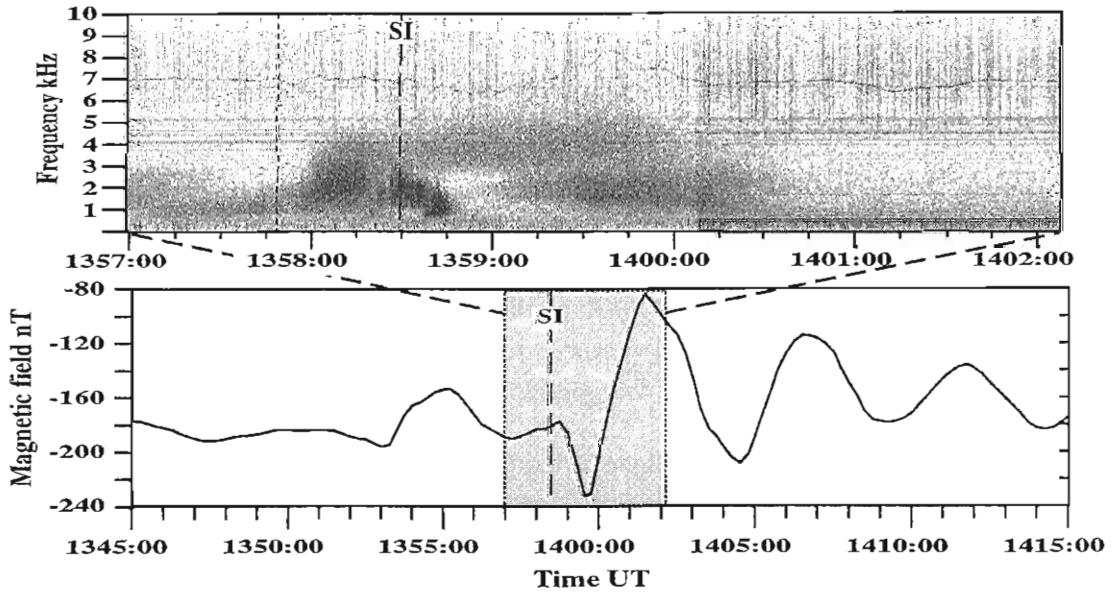
Kuva 3.2 (a) Magneettiseen impulssiin liittyvä VLF-suhinan taajuus- ja intensiteettimuutos Liikkuvankankaalla ($63,9^{\circ}\text{N}$) 13.06.1990 ~1416 UT. Tiheä katkoviiva osoittaa suhanan voimistumisen alkuperäisen. (b) Magneettikentän X-komponentti Sodankylässä 1400-1430 UT.

Pomokaira 07 Oct, 1991



Kuva 3.3 (a) Magneettiseen impulssiin liittyvä VLF-suhinan taajuus- ja intensiteettimuutos, johon liittyy voimakkaita verkkoharmonisia Pomokairassa ($64,3^{\circ}\text{N}$) 07.10.1991 \sim 1257 UT. Tiheä katkoviiva osoittaa suhan voimistumisen alkuhetken. (b) Magneettikentän X-komponentti Sodankylässä 1245-1315 UT.

Pomokaira 07 Oct, 1991



Kuva 3.4 (a) Magneettiseen impulssiin liittyvä erittäin voimakas VLF-suhinan taajuus- ja intensiteettimuutos Pomokairassa 07.10.1991 \sim 1358 UT. Tiheä katkoviiva osoittaa suhan voimistumisen alkuhetken. (b) Magneettikentän X-komponentti Sodankylässä 1345-1415 UT.

gian ja edellytykset VLF-aaltojen syntyyn ovat hävinneet joksikin aikaa. Suhinan päättymistä ei voida selittää absorptiolla, koska riometrillä ei ole havaittu absorptiota.

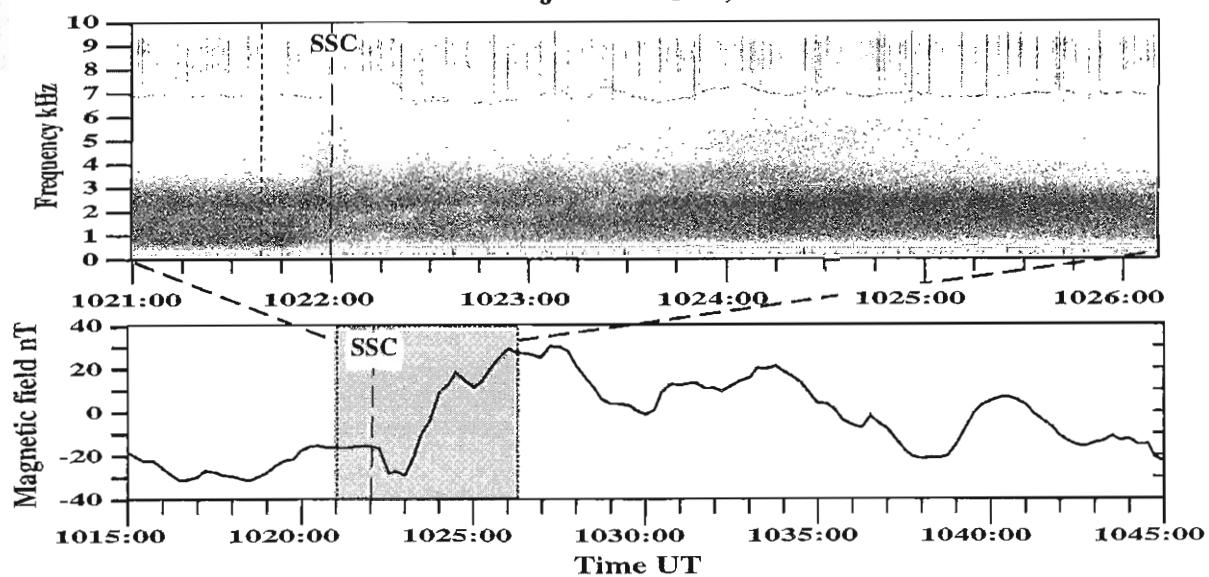
Kuvassa 3.2 on esitetty tyypillinen esimerkki SSC:hen liittyvästä voimakkaasta VLF-suhinan taajuus- ja intensitettimuutoksesta. Siinä havaitaan pitkään jatkuneen suhanan voimistuminen juuri ennen SSC:tä ja suhanan häipyminen kokonaan impulssin jälkeen. MANNINEN *et al.* (1991) ovat esittäneet yksityiskohtaisen tarkastelun kyseisestä tapauksesta. Muutokset suhanan taajuudessa ovat osittain samankaltaisia kuin Pc 1-pulsaatiossa äkillisen impulssin yhteydessä (esim. KANGAS *et al.*, 1984). Ilmiöt eroavat toisistaan siinä, että Pc 1:n taajuudessa tapahtuu yleensä porrasmainen taajuuskaistan hyppy, mutta VLF-suhinassa koko taajuusalue kasvaa.

Pomokairassa 07.10.1991 rekisteröidyissä suhinoissa (kuvat 3.3 ja 3.4) nähdään selvästi myös sähkölinjoista säteilevät harmoniset (PLHR) taajuuskaistalla 3,5–5,5 kHz. Varsinkin kuvassa 3.3 esitetty SI:hin liittyvä VLF-suhina rajoittuu ylätaajuuksillaan varsin selvästi PLHR:n alimpiin taajuuksiin. Toisaalta PLHR:n yläpuolella on intensiteetiltään suhteellisen heikko, mutta hyvin pitkäkestoinen vihellyskaikusarja. Vihellykset ovat poikkeuksellisen korkeilla taajuuksilla ollakseen tavallisia, mutta esimerkiksi PARK (1977) on havainnut vastaavan ilmiön nimenomaan PLHR:n yhteydessä. Lisäksi hän toteaa, että kaikkein voimakkaimmat harmonisiin liittyvät VLF-aallot esiintyvät yleensä magneettisen myrskyn palautumisvaiheen aikana. Tämä sopii hyvin yhteen Pomokairassa 07.10.1991 rekisteröityjen tapausten kanssa. Tuolloin rekisteröintejä edelsi hyvin voimakas magneettinen myrsky (Sodankylän K_{HDZ} -indeksi oli 7). Toisaalta havaintopäivä oli maanantai, joka tunnetusti on aktiivisin PLHR-esiintymisajankohta (ks. PARK *et al.*, 1983).

Voidaankin perustellusti kysyä, mikä on PLHR:n rooli kuvan 3.3 tapauksessa. Selvästikin koko mittattu kaista jakaantuu kolmeen osaan, joista jokaista hallitsee tietty VLF-ilmiö. Alimmat taajuudet täyttää magnetosfäriseen prosessiin liittyvä suhina. Ylimpänä maanpinnalta alkunsa saanut vihellyssarja on valloittanut lievästi poikkeuksellisen taajuuskaisstan ja näiden kahden luonnon oman VLF-ilmiön väliin ovat ihmisen aiheuttamat PLHR:t varanneet oman kaistansa. Toisaalta PLHR:t näyttävät toisinaan ”elävän” kokonaan omaa elämäänsä, sillä niissä havaitut taajuusmuutokset tai intensiteettivaihtelut eivät välittämättä liity muihin VLF-taajuuksilla esiintyviin ilmiöihin.

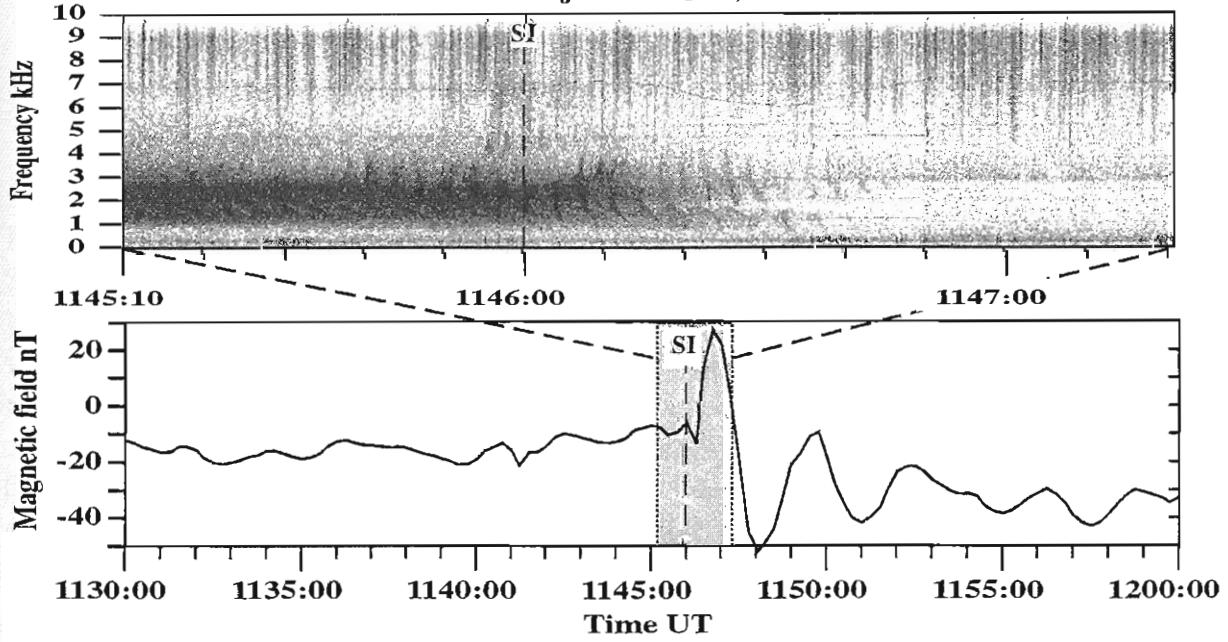
Porojärvellä 19.01.1994 rekisteröidyt suhanan intensiteetti- ja taajuusmuutokset (kuvat 3.5 ja 3.6) liittyvät SSC:hen, joka ei kuitenkaan alkuun aiheuttanut kovin suuria muutoksia suhinaan. VLF-intensiteetin ja -taajuuden muutokset ovat silti selvästi havaittavissa. Magnetosfärin puristustilan lauetessa 1146 UT muutokset ovat aivan päinvastaiset. Tällöin intensiteetti laskee 10^5 -osaan, eli suhina ja emissiot häviävät kokonaan. Ainoastaan PLHR:t ja niihin liittyvät heikot emissiot pystyvät säilyttämään oman kaistansa. Vaimenen selitetään yleensä absorptiolla (esimerkiksi GAIL *et al.*, 1990b ja GAIL and INAN, 1990), mutta syy voi löytyä myös magnetosfäristä. Kun puristustila laukeaa, VLF-aaltojen syntalueella syklotroniresonansiin vaadittavat olosuhteet muuttuvat rajusti.

Porojärvi 19 Jan, 1993



Kuva 3.5 (a) SSC:hen liittyvä VLF-suhinan taajuus- ja intensiteettimuutos Porojärvellä ($66,2^{\circ}\text{N}$) 19.01.1993 \sim 1022 UT. Tiheä katkoviiva osoittaa suhanan voimistumisen alkuhetken. (b) Magneettikentän X-komponentti Sodankylässä 1015-1045 UT.

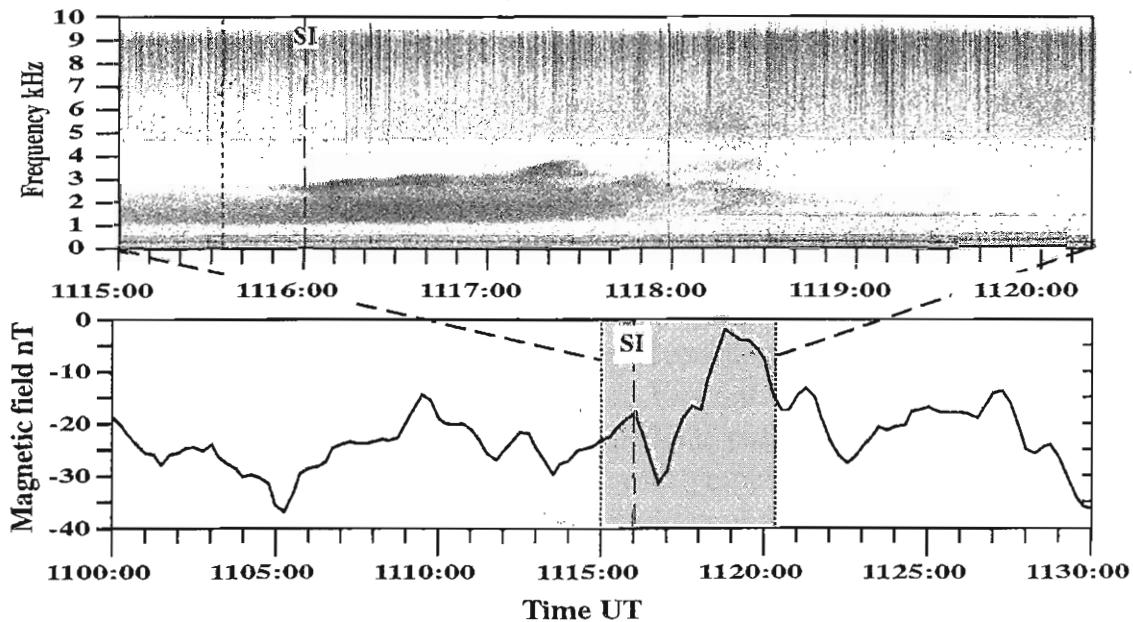
Porojärvi 19 Jan, 1993



Kuva 3.6 (a) Magneetosfäärin puristustilan laukeamiseen liittyvä nopea VLF-suhinan ja -emissioiden intensiteetin lasku Porojärvellä 19.01.1993 \sim 1146 UT. (b) Magneettikentän X-komponentti Sodankylässä 1130-1200 UT.

Mikäli kyseessä olisi absorptio, eivät hetkeä myöhemmin esiintyvä vihellyksen liipaisemat kuorot ja alataajuksille palaava suhina voisi myös käään edetä maanpinnalle. Kuvan 3.6 tapauksessa riometrillä havaittavaa absorptiota ei kuitenkaan ole rekisteröity. Kuoro ja suhina voimistuvat jälleen entiselle tasolle noin 1239 UT.

Porojärvi 25 Jan, 1993

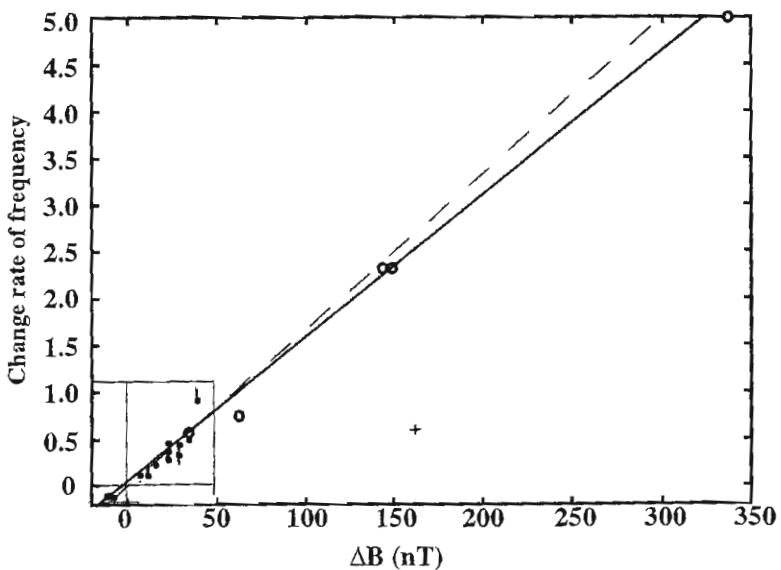


Kuva 3.7 (a) Magneettiseen impulssiin liittyvä VLF-suhinan taajuus- ja intensiteettimuutos Porojärvellä 25.01.1993 ~1115 UT. Tiheä katkoviiva osoittaa suhinan voimistumisen alkuperäisen. (b) Magneettikentän X-komponentti Sodankylässä 1100-1130 UT.

Porojärvellä 25.01.1994 rekisteröity magneettiseen impulssiin liittyvä VLF-suhina (kuva 3.7) poikkeaa edellisistä lähinnä voimakkuudeltaan. Suhina käyttää hyvin tarkkaa. Lisäksi samaan aikaan ylätaajuksilla on havaittavissa heikko kapeakaistainen suhina, jollaisia rekisteröitiin useita 0700-0937 UT välisenä aikana. Kun edellisissä esimerkeissä ilmiön intensiteetin kasvuun on liittynyt nopea taajuuden muutos, tilanne on kuvan 3.8 tapauksessa erilainen. Siinä taajuus kasvaa hitaasti, mutta koko ajan, kunnes suhina häviää. Intensiteettimaksimin jälkeen ei muodostu tyypillistä ”pilvimäistä” suhinaa.

Poikkeavuudet voivat liittyä erilaiseen magneettiseen aktiivisuuteen, sillä koko aamupäivän ajan esiintyi hyvin voimakasta Pc 1-pulsaatiota. Varsinkin korkeataajuinen kapeakaistainen suhina (ks. kuva 3.14) saattaa liittyä magneettisiin pulsaatioihin. Aiheesta tarkemmin kappaleissa 3.2.2 ja 3.2.3.

Äkillisiin impulsseihin liittyvissä tapauksissa on verrattu VLF-kuoron taajuudenmuutoksen ja magneettisen impulssin voimakkuuden välistä riippuvuutta (kuva 3.8). VLF-



Kuva 3.8 VLF-kuoron taajuudenmuutosasteen ja magneettisen impulssin voimakkuuden välinen riippuvuus. Vasemmassa alakulmassa japanilaisista havainnot merkittynä umpinaisilla palloilla (ko. kuva on artikkelista HAYASHI *et al.*, 1968). Avonaiset ympyrät ovat kuvien 3.2-3.5 ja 3.7 tapauksista. + liittyy kuvan 3.1 tapaukseen. Katkoviiva on yhtälön (3.2) kuvaja ja yhtenäinen viiva on pienimmän neliösumman suora, jonka laskemiseen on käytetty kaikki pistet +:aa lukuunottamatta.

kuoron taajuudenmuutosaste (*change rate of frequency*) on

$$\Delta f/f_1 = (f_2 - f_1)/f_1, \quad (3.1)$$

missä f_1 on kuoron keskitaajuus juuri ennen magneettista impulssia ja f_2 on vastaava taajuus impulssin jälkeen. Kokeelliset havainnot on esitetty kuvassa 3.8 (omat tapaukset vuosilta 1990-1993 ja japanilaiset tapaukset vuodelta 1966). HAYASHI *et al.* (1968) ovat määritelleet lineaarisen yhtälön $\Delta f/f_1$:n ja ΔB :n välille (ΔB :n yksikkö on nT)

$$\Delta f/f_1 \cong \frac{5}{300} \Delta B \text{ [nT]}, \quad (3.2)$$

jonka kuvaja on esitetty katkoviivalla kuvassa 3.8. Yhtenäinen viiva on pienimmän neliösumman suora, jonka laskemiseen on käytetty kaikki pistet jättiläispulsaatioon liittyvää tapausta (+:aa) lukuunottamatta. Sovituksissa on pieni ero (kulmakerroin japanilaisilla 0,0167 ja omassa sovituksessa 0,0149), joka johtuu yhdestä pistestä japanilaisien havainnoissa. Omat havaintomme antavat huomattavan lisätodisteen taajuudenmuutosasteen ja ΔB :n välisestä lineaarisesta suhteesta, koska havainnot kattavat paljon suuremman ΔB -alueen. Pitää kuitenkin ottaa huomioon, että japanilaiset ovat käyttäneet keskileveysasteiden magnetogrammeja ja omat havaintomme liittyvät korkeiden leveysasteiden havaintoihin. Toisaalta kuva 3.8 osoittaa, että taajuudenmuutosasteen ja ΔB :n välinen suhde säilyy ilmeisesti leveysasteesta riippumatta.

Kuvasta 3.8 nähdään myös selvästi, ettei jätiläispulsaatioon liittyvä VLF-suhinan muutos kuulu samaan joukkoon äkillisiin impulsseihin liittyvien suhinoiden kanssa huolimatta dynaanisten spektrien samankaltaisuudesta.

SI-tyyppisiä magneettisia pulsseja on havaittu EISCAT-kampanjan aikana 17.12.1990. Niihin liittyy myös VLF-emissioita ja impulsiivisia elektronipresipitaatioita. Aluksi EISCATilla havaittuja presipitaatiopurskeita (ja revontulipulsaatioita) ajateltiin hyvin paikallisiksi ilmiöiksi. Kuitenkin laajemmat tutkimukset magnetometriaineistoa käyttäen osoittivat, että kyseessä onkin hyvin laaja-alainen häiriötilanne, johon liittyy elektronipresipitaatiota noin 3000 km leveällä alueella alkaen keskipäivän sektorilta ja päättynen aamusektorille (yksityiskohtaisesti aihetta ovat käsitelleet YAHNIN *et al.*, 1995, liitteenä B1).

Magneettisissa rekisterönneissä Siperiasta Grönlantiin havaittiin useita SI-tyyppisiä impulsseja 0410 UT jälkeen. Ne näkyivät myös riometriabsorptiona laajalla alueella ja aamusektorilla (LOV ja SOD) niihin liittyi VLF-kuoropurskeita. Samaan aikaan EISCATTutkalla havaittiin ionosfäärin E-kerroksessa voimakasta elektronipresipitaatiota ($N_e > 10^{11} \text{ m}^{-3}$). YAHNIN *et al.* (1995) ovat tulkinneet nämä ilmiöt indikaattoreiksi magnetosfäärissä tapahtuneelle globaalille puristumiselle. He päättelivät myös, että pienimuotoiset MIE:t (Magnetic Impulsive Event), jotka ilmenevät ionosfäärissä vortex-tyyppisinä virtajärjestelminä, liittyvät SI-tyyppisiin magneettisiin impulsseihin. Toisaalta molempien ilmiöiden synty liittyy aurinkotulen epähomogeenisuksien ja Maan magnetosfäärin vuorovaikutukseen. Siis kyseessä on saman ilmiöryhmän kaksi eri ilmenemismuotoa.

Revontulialimyrskyn aiheuttamat impulsiiviset presipitaatiopurskeet liittyvät myös VLF-emissioihin. VLF-emissioiden ja magneettisten impulssien suhdetta ovat käsitelleet tarkemmin MANNINEN *et al.* (1995) (liitteenä B2). He ovat tutkinneet Sodankylässä ($67,51^\circ \text{ N}$, $26,33^\circ \text{ E}$) ja Lovozerossa ($67,97^\circ \text{ N}$, $35,08^\circ \text{ E}$) 17.12.1990 rekisteröityjä VLF-emissioita. Tällöin löydettiin kahdentyyppistä presipitaatiota. Ensimmäinen tyyppi on muutamia sekunteja kestävä presipitaatiopurske, joka toistuu muutamien kymmenien tai satojen sekuntien jaksoissa. Tällöin elektronit (20–30 keV) ovat peräisin keskiyön sektorilla tapahtuneesta revontulialimyrskystä. Samanaikaisesti havaitut VLF-emissiot voidaan selittää syklotroniepästabiliisuudella magnetosfäärissä. Toinen havaittu presipitaatiotyyppi liittyy magneettisiin impulsseihin (SI). Presipitaation kesto on useita minuutteja. VLF-emissioiden (1,5–2,5 kHz) spektrumuodot ja ajalliset vaihtelut voidaan tällöin selittää syklotroniepästabiliisuuden ja ajallisesti muuttuvan magneettikentän avulla.

VLF-emissioiden taajuudesta (1,2–2,3 kHz) (kuva 3, MANNINEN *et al.*, 1995) voidaan päätellä presipitoituvien elektronien energiaksi 10–40 keV. IMHOFF *et al.* (1994) ovat tarkemmin tutkinneet aaltojen taajuuksien suhdetta hiukkasen energioihin CRRES-satelliittia käyttäen. Elektronisyklotroniepästabiliisuuden uskotaan olevan pääsyy elektronipresipitaatioon SI- ja SSC-impulssien aikana. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että jokaiseen SI- ja SSC-impulssiin välttämättä liittyisi VLF-aaltoja ja presipitaatiota (esimerkiksi GAIL *et al.* (1990b) eivät havainneet kaikissa tapauksissa VLF-ilmiötä). Parhaat olosuhteet

VLF-aaltojen ja presipitaation syntyyn ovat aamusktorilla alimyrskyn aikana. (SAITO *et al.*, 1974)

3.2 Yhteydet magneettisiin pulsaatioihin

3.2.1 VLF ja Pc 3-4-pulsaatiot

Kvasiperiodisten (QP, Quasi-Periodic) VLF-emissioiden ja magneettisten pulsaatioiden välisiä relaatioita ovat tutkineet esimerkiksi CARSON *et al.* (1965), SATO *et al.* (1974), SATO and KOKUBUN (1980), SATO and KOKUBUN (1981) ja SATO and FUKUNISHI (1981). Selvimmät korrelaatiot löytyvät VLF-intensiteetin ja Pc 3-4 pulsaatioiden väliltä.

SATO and KOKUBUN (1980) ovat jakaneet ELF-VLF-emissiot kahteen päälukuun, joista ensimmäinen (QP1) liittyy vahvasti Pc 3-4-pulsaatioihin ja toinen (QP2) esiintyy ilman havaittavaa pulsaatioaktiivisuutta. He keskittyivät kuitenkin QP1-tyyppisiin tapauksiin. Lukuisat esimerkit osoittivat, että QP1-emissioiden intensiteettivaihtelulla ja Pc 3-pulsaatioilla oli täsmälleen sama jaksonpituus. Yleensä QP1-emissioiden intensiteettivaihtelun ja Pc 3-pulsaatioiden välinen koherenssi oli 0,8–0,9, mikä myös osoittaa ilmiöiden liittyvän yhteen. Koherenssi oli hieman suurempi magneettisen D- kuin H-komponentin kanssa. SAZHIN and HAYAKAWA (1994) ovat esittäneet satelliittihavaintojen perusteella, että avaruudessa QP1- ja QP2-tyypit ovat itse asiassa identtiset. Kuitenkin SATO and KOKUBUNIN (1980) jakotapaa voidaan hyvin käyttää maanpintahavaintojen yhteydessä.

QP-emissioiden intensiteettivaihtelun ja Pc 3-pulsaatioiden välinen vaihe-ero on tärkeä parametri selvitettäessä QP-emissioiden synty- ja moduloitumismekanismia, kun vuorovaikutusalueen oletetaan olevan ekvaattorialueella magnetosfärissä. Koska vihellys- ja Alfven-moodin aalloilla on erilainen etenemisnopeus, maanpinnalla pitäisi havaita viive näiden kahden aallon välillä. Tämä havaitaan QP-emissioiden intensiteettivaihtelun ja Pc 3-pulsaatioiden välisenä vaihe-erona, joka kasvaa pulsaation jaksonpituuden lyhentyessä. Tällöin pulsaation jaksonpituuden ollessa sama kuin hydromagneettisen aallon viive QP-emissioihin maanpinnalla vaihe-ero on 2π . Vastaavasti, jos jaksonpituus on puolet viiveestä maanpinnalla vaihe-ero on 4π . Luonnollisesti induktiokelamagnetometristä aiheutuu lisäksi vaihe-ero $\pi/2$, joka pitää ottaa huomioon.

SATO and KOKUBUN (1980) havaittivat magneettisen pulsaation yleensä noin 20–30 s QP-emissioiden jälkeen. Viive on sama kuin SI- ja SSC-tapaaksiin liittyvissä VLF-suhinoissa. CORONITI and KENNEL (1970) ovat esittäneet ensimmäisenä teoreettisesti ULF-VLF-vuorovaikutuksen mahdollisuuden.

SATO and KOKUBUN (1981) ovat koonneet omat havaintonsa QP2-tyypistä kolmekohdaiseksi listaksi:

- 1) QP2-tyyppisten emissioiden intensiteettimodulaation taajuus on hyvin stabiili verrattuna QP1-tyyppisiin emissioihin, vaikka QP2-emissiot muuttuvatkin koko ajan hitaasti.

- 2) Useimmissa tapauksissa QP2-emissiosta magneettisella pulsaatiolla ei ole havaittavissa samaa jaksonpituitta kuin ELF-VLF-emissioilla. Tämä pätee varsinkin, kun magneettinen aktiivisuus on minimissään.
- 3) Kuitenkin yhtäläisyyttä on havaittavissa, kun magneettinen aktiivisuus on vähintään keskitasoa.

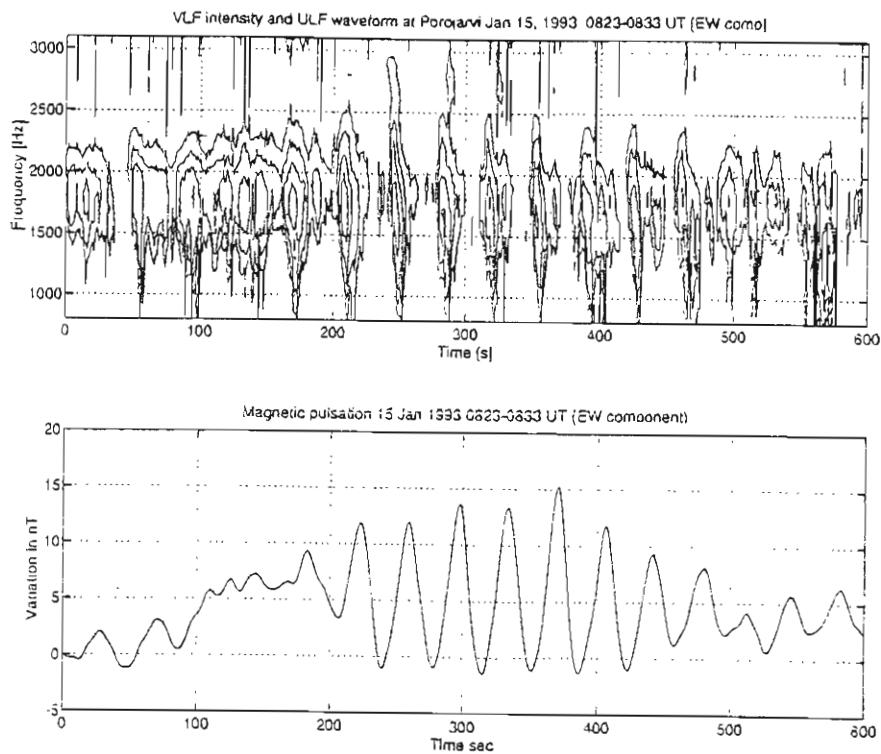
VLF-emissioiden moduloituminen Pc 3-pulsaatioiden vaikutuksesta on kohtalaisen tunnettu ilmiö. Sitä vastoin optisen revontulipulsaation liittyminen edellä mainittuun vuorovaikutukseen on havaittu vasta viime aikoina (esimerkiksi ENGBRETSON *et al.*, 1994; MANNINEN *et al.*, 1994). ENGBRETSON *et al.* (1994) ovat esittäneet rekisteröintejä South Pole'n asemalta Etelänapamantereelta. He havaittivat, että revontulipulsaatioissa esiintyy Pc 3–4-taajuuksia vain, jos esiintyy myös magneettisia Pc 3–4-pulsaatioita. Yleensä he rekisteröivät VLF-emissioissa saman jaksonpituuden, mutta joissakin tapauksissa VLF-emissiosta puuttui modulaatio kokonaan. Tästä syystä CORONITIN ja KENNELLIN (1970) esittämän teorian lisäksi on oltava vielä jokin toinen mekanismi, joka voi moduloida elektronipresipitaatiota.

3.2.2 Mittaustuloksia Suomesta ja lähialueilta

Suomessa tehdyissä rekisteröinneissä on havaittu hyvä korrelaatio VLF-intensiteetin ja Pc 3-pulsaation välillä 0823–0833 UT 15.01.1993 Porojärvellä. Magneettinen Pc 3-pulsaatio alkoi noin 0555 UT. Juuri ennen auringonnousua havaittiin myös optisessa revontulipulsaatiossa sama noin 30 sekunnin jakso. Edeltävänä päivänä Sodankylän magneettista häiriöisyyttä kuvaava K_{HDZ} -indeksi oli suurimmillaan 5, mikä kuvaa kohtalaisen voimakasta magneettista aktiivisuutta. Havaintohetkellä vastaava arvo oli vain 2 eli aktiivisuus oli pienentynyt huomattavasti (asteikko on logaritmisen).

VLF-aktiivisuuden voimistuminen alkaa jo noin 0740 UT ja ensimmäisen kerran selvä Pc 3-modulaatio on havaittavissa 0747–0757 UT. Muutaman minuutin tauon jälkeen VLF-intensiteetissä havaitaan sama modulaatio, joka kestää noin 0835 UT saakka. Kuvassa 3.9 on esitetty VLF-spektri contour-kuvana ja magneettisen pulsaation EW-komponentti Kilpisjärvellä. Tämän jakson lopussa modulaatio on kaikkein voimakkain ja viive ULF-ja VLF-pulsaatioiden välillä on noin 30–40 s. Jälleen muutaman minuutin tauon jälkeen modulaatio ilmaantuu ja se kestää 0926 UT saakka. Viimeksi mainittua seuraa yli kahden tunnin tauko, jolloin VLF-alueen hallitsevimmät ilmiöt ovat korkeataajuisia emissioita. 1137 UT intensiteettimodulaatio voimistuu yllättäen ja päättyy kokonaan 1207 UT. Tähän ei liity voimakasta maanpinnalla havaittavaa Pc 3-pulsaatiota.

Optinen pulsaatio havaittiin ensimmäisen kerran noin 0600 UT, josta alkaen sen jaksonpituuks oli sama kuin Pc 3:lla. Auringonnousun vuoksi optiset rekisteröinnit lopetettiin 0722 UT. MANNINEN *et al.* (1994) (liitteenä B3) ovat esittäneet havaintojaan kyseisestä tapauksesta. He ovat tutkineet myös riometriabsorptiota vastaavalta ajalta Kilpisjärveltä, Kevolta ja Ivalosta, mutta minkäänlaista yhteyttä pulsaatioihin ei ollut havaittavissa.



Kuva 3.9 VLF-spektri contour-kuvana 15.01.1993 0823-0833 UT (yläpaneeli) ja magneettisen pulsaation EW-komponentti Kilpisjärvellä (alapaneeli).

Suomalaiset havainnot absorptiota lukuun ottamatta ovat Porojärveltä. Vastaavanlaiset rekisteröinnit on tehty myös Lovozerossa Venäjällä, mutta noin puolitoista tuntia aikaisemmin, sekä Husafellissa Islannissa (japanilaisten asema) noin puolitoista tuntia Porojärveä myöhemmin. Lovozerossa noin 0700 UT havaittujen ULF- ja VLF-pulsaatioiden välillä on noin 30-40 s viive, eli sama kuin Porojärvellä 0823 UT. Ulkolaisten asemien mittausaineisto ei ole ollut tästä tutkielmaa tehtäessä käytettävissä. Lovozerossa on havaittu hyvä korrelaatio myös samaan aikaan kuin Suomessa, mutta heikompana.

Vertailemalla eri asemilla tehtyjä havaintoja voidaan esittää joitakin arvioita VLF-ULF-vuorovaikutusalueen sijainnista. Koska maa-ionosfääriaaltojen rajataajuus on noin 1,6 kHz (esim. HELLIWELL, 1965), sitä matalataajuisemmat aallot eivät voi edetä muutamaa sataa kilometriä pitemmälle, ~07 UT havaitun modulaation lähdealue on oltava lähellä Lovozeron meridiaania (todennäköisesti sen itäpuolella). Vastaavasti ~0830 UT se on lähellä Porojärveä, mutta kuitenkin vielä Lovozeronkin havaittavissa (siis näiden välissä). Myöhemmin Islannissa havaittu modulaatio ei enää näy edes Porojärvellä, joten lähdealue lienee jossakin Islannin liepeillä.

3.2.3 VLF ja Pc 1-pulsaatiot

Yksi tuntemattomimmista magneettisten pulsaatioiden ja VLF-aaltojen mahdollisista yhteyksistä liittyy vihellyksen liipaiseman kuoron (whistler triggered chorus) ja Pc 1-

pulsaatioiden välille. Ensimmäisen kerran ilmiöön on viitannut STOREY (1953). HELLIWELL (1965) on esittänyt spektrogrammeja vihellyksen liipaisemista korkeataajuisista emissiopurskeista kirjassaan, mutta varsinaista selitystä hänen lähtö ei ole. Kuitenkin hän havaitsi, että ilmiö esiintyy yleensä korkeilla leveysasteilla. Esimerkkinä hän esittää samanaikaiset rekisteröinnit Stanfordissa (ST, 44° N) ja Seattlessa (SE, 54° N), jotka osoittavat, että ST:ssa havaitaan vain vihellys, mutta korkeamman leveysasteen asemalla SE:ssa vihellykseen liittyy VLF-kuoro taajuusalueella ≥ 6 kHz.

SMITH *et al.* (1985) ovat tutkinneet korkeataajuisia vihellyksia aiheuttamia kuoroja sekä satelliitti- että maanpintamittauksista. DE-1-satelliitin rekisteröinneistä havaitaan suihin olevan lähes jatkuvaa, mutta vasta vihellyksen jälkeen ilmiö on havaittavissa maanpinnalla. Samoin kuin edellä, Stanfordin ja Seattlen tapauksissa, SMITH *et al.* (1985) ovat esittäneet vihellyksen liipaiseman kuoron, joka havaitaan Halley Bayssa ($L=4,3$) ilman vihellystä, mutta Palmerissa ($L=2,3$) puolestaan on rekisteröity vain vihellys ilman kuoroa. Satelliitissa havaitaan molemmat, joita kuoro voidaan sen perusteella todeta vihellyksen liipaisemaksi. SMITH *et al.* (1985) toteavat ilmiön esiintyvän magneettisesti rauhallisena aikana – kuitenkin kohtalaisen magneettisen myrskyn jälkeen. Havainnon tekee mielenkiintoiseksi se, että samaan aikaan Sodankylässä on rekisteröity Pc 1-pulsaatioita yhtäjaksoisesti noin vuorokausi, joita todennäköisesti myös Halley Bay:n alueella on ollut Pc 1-aktiivisuutta.

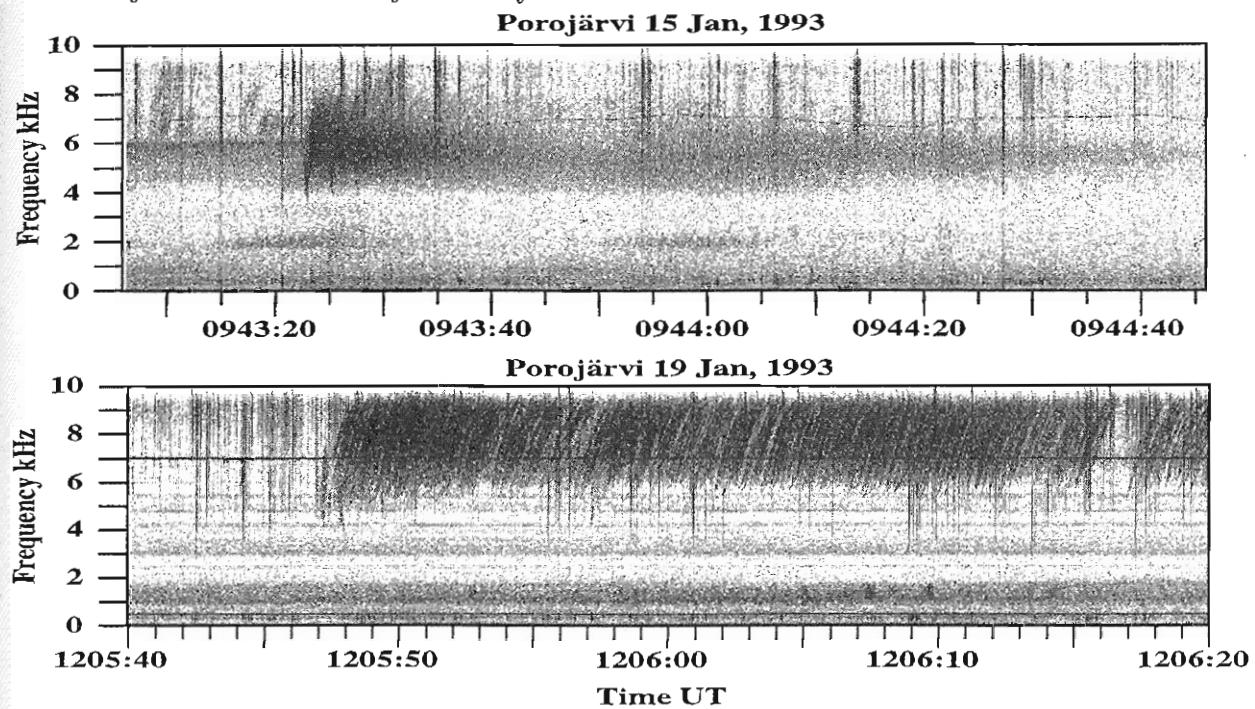
Suomessa on rekisteröity VLF-aaltoja vuosina 1989–1993 yhteensä noin 1500 tuntia, mutta vasta tammikuussa 1993 havaittiin ensimmäiset vihellyksen liipaisemat kuorot. Esimerkiksi 15.01.1993 rekisteröitiin 259 korkeataajuista liipaistua emissiopursketta, Vastaavasti 16.01.1993 tapauksia oli kymmeniä ja 19.01.1993 viisi. Yksityiskohtaisemmat tutkimukset osoittavat, että ilmiö esiintyy yleensä ”normaalina” VLF-aktiivisuuden ollessa vähäinen ilmiön havaitsemishetkellä. Kuitenkin sekä ennen vihellyksen liipaisemien kuorojen esiintymistä että niiden jälkeen VLF-aktiivisuus on hyvin korkea. Esimerkiksi 19.01.1993 magnetosfäärin puristustilan lauetessa 1147 UT (kuva 3.7) hyvin voimakas VLF-kuoro häviää kokonaan, minkä jälkeen se voimistuu uudelleen noin 1239 UT. Kuitenkin 1147–1239 UT aikana rekisteröitiin viisi vihellyksen liipaisemaa korkeataajuista kuoroa, jotka olivat tuolloin ainoat havaitut VLF-ilmiöt. Tämä viittaa siihen, että sopivat olosuhteet VLF-aaltojen syntymiselle ovat olemassa. Toinen kiinnostava piirre, joka liittyyneet edellä mainittujen kuorojen syntymiseen, on magneettisten Pc1-aaltojen esiintymisen samaan aikaan.

Magneettisiin pulsaatioihin saattavat liittyä myös yli 6 kHz:n taajuuksilla esiintyvät hyvin kapeakaistaiset ($\Delta f \sim 100$ Hz) suhinat, joita on havaittu ainoastaan 25.01.1993 Porojärvellä (kuva 3.12). FRANCIS *et al.* (1983) ovat esittäneet ainoan aihetta sivuavan tutkimuksen. Siinä havainnot perustuvat vuoden 1972 rekisteröintieihin Halleyn asemalla ($L=4,3$) Etelännapamantereella ja tekijät kytkevät ilmiön PLHR:iin. Lisäksi he ovat löytäneet kyseisestä ilmiöstä 1,98 sekunnin jaksollisuuden, jonka tekijät selittävät liittyyvän kahden hypyn etenemiseen pallonpuoliskolta toiselle. Toisaalta noin kahden sekunnin jakson-

pituus sattuu juuri Pc 1-pulsaatioiden kaistalle.

3.2.4 Mittaustuloksia Suomesta ja lähialueelta

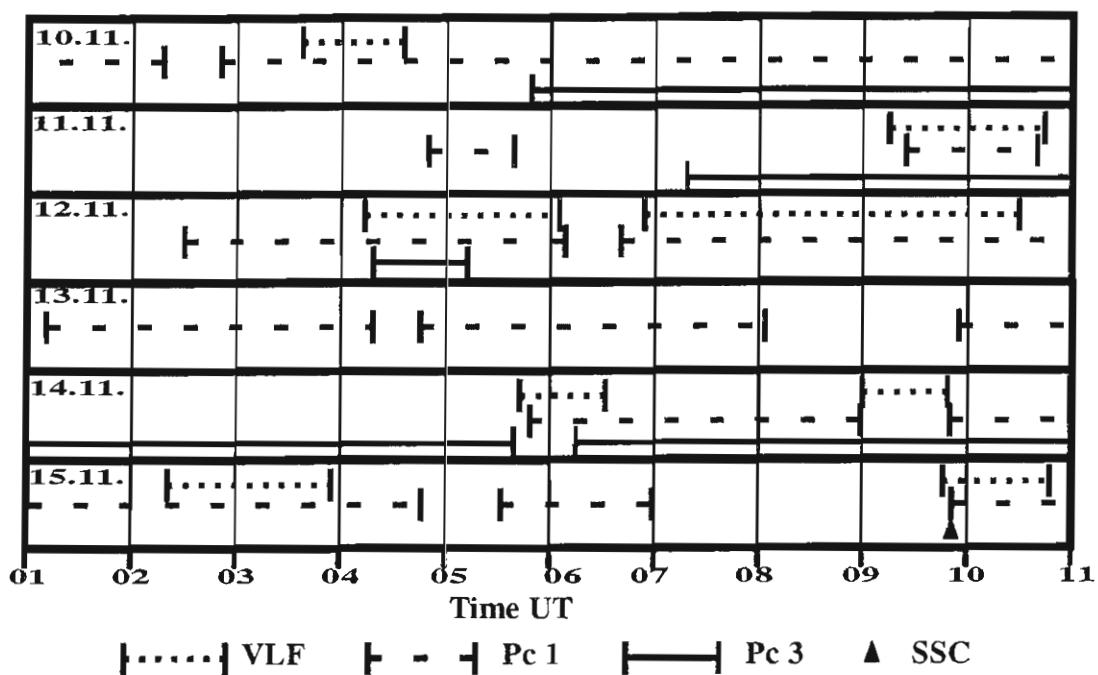
VLF-aaltojen ja Pc 1-2-pulsaatioiden välistä vuorovaikutusta ei ole havaittu suoraan intensiteettimodulaationa, joten tilannetta pitää lähestyä eri tavalla. Vuorovaikutuksen olemassaolo on kuitenkin ilmeinen, sillä korkeataajuisia (5–9 kHz) emissioita ja vihellyksen liipaisemia kuoroja on havaittu vain, jos myös Pc 1-2-aktiivisuutta on esiintynyt. Tämä ei kuitenkaan pade toisinpäin, eli magneettisen pulsaation olemassaolo ei takaa korkeataajuisen VLF-kuorojen esiintymistä.



Kuva 3.10 Vihellyksen liipaisema korkeataajainen kuoro 15.01.1993 0943:20 UT (yläpaneeli) ja 19.01.1993 1205:45 UT (alapaneeli), molemmat on rekisteröity Porojärvellä.

Vihellyksen liipaiseman kuoron taajuusalue on ollut tyypillisesti ~5–10 kHz (ylärajataajuuden määrittäminen on ajoittain vaikeaa, sillä rekisteröintilaitteiston ylärajataajuus on 9,2 kHz). Kuoro koostuu nousevista diskreeteista emissioista, joilla on koko ajan sama dispersio, vaikka ilmiö kestääsi minuutinkin. Diskreettien emissioiden väli on alle 100 ms, jolloin sitä ei voida selittää aallon peililiikkeellä pallonpuoliskolta toiselle. Joissakin tapauksissa kuoro myös päättyy vihellykseen. Tutkimisen arvoisen ilmiöstä tekee se, että vihellyksen liipaisema kuoro on yksi voimakkaimmista VLF-ilmiöistä. Vaikka tässä yhteydessä ilmiötä kutsutaan vihellyksen liipaisemiksi kuoroiksi, osassa tapauksia kyseessä on vihellyksen liipaisema suhina. Kuvassa 3.10 on esitetty kaksi esimerkkitapausta tammikuulta 1993.

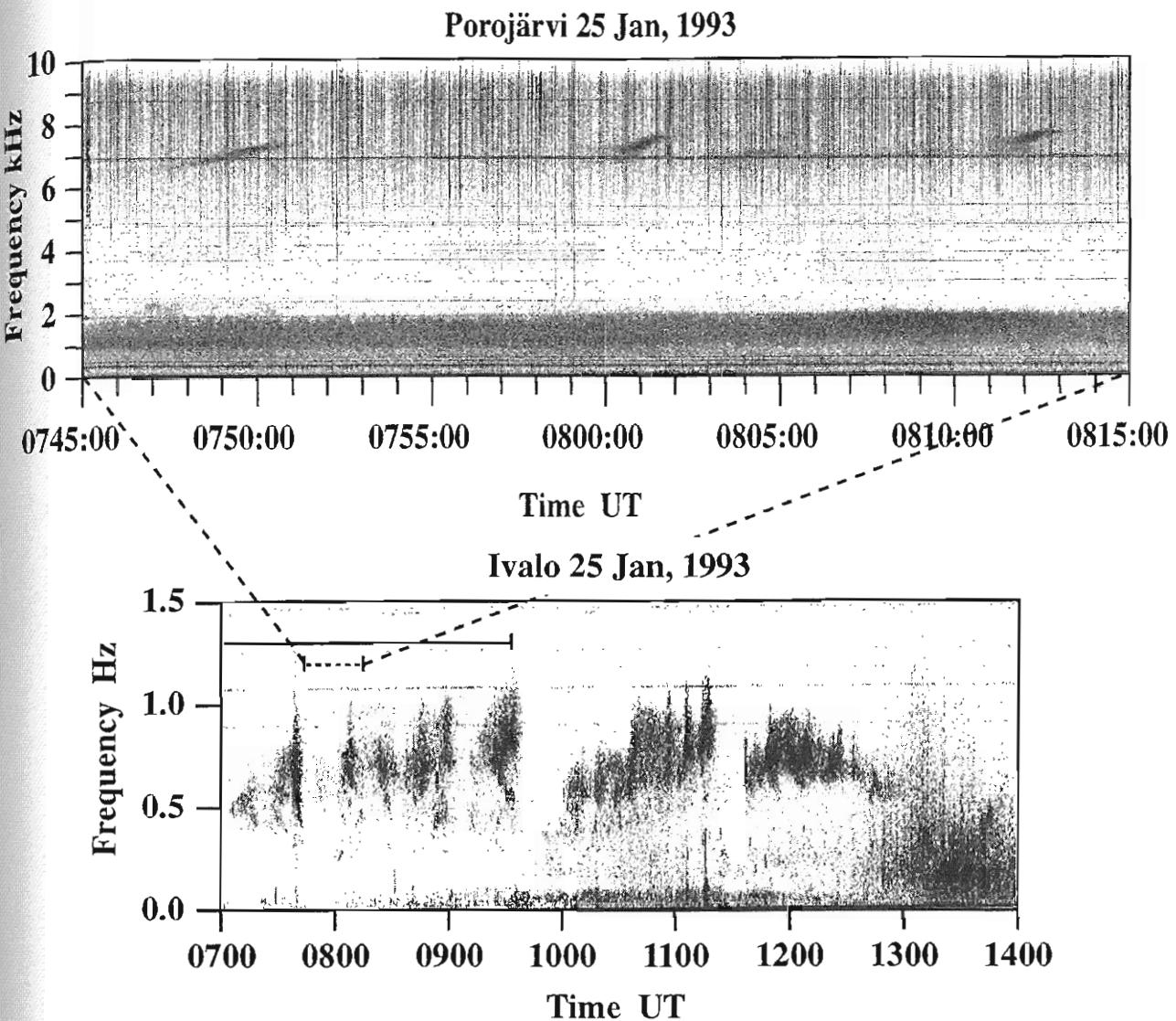
Kaikkiaan 259:stä tapauksesta vain 105 on selvästi vihellyksen aiheuttamia. Loput 154 näyttävät olevan vihellyksestä riippumattomia. Kuitenkin yksityiskohtainen tilastollinen tarkastelu osoittaa, että kummakin tyypit käyttäytyvät samoin. Siis ainoa ero on liipaisevan vihellyksen havaitsemisessa. Voidaan kohtuullisesti olettaa kaikkien 259 tapauksen olevan vihellyksen liipaisemia, mutta vihellyksien erilaisesta etenemisestä ja luontesta johtuen vain harvat voidaan rekisteröidä maanpinnalla. Toisaalta alarajataajuus liittyyne PLHR:iin. Aiheesta on tekeillä julkaisu GONCHAROVA *et al.*, jossa pohditaan eri syntymekanismeja ja liipaisevan vihellyksen erityispiirteitä.



Kuva 3.11 Korkeataajuisten VLF-ilmiöiden sekä Pc 1- ja Pc 3-pulsaatioiden esiintyminen aamutuntien aikana marraskuun 1993 kampanjassa. Pc 1-havainnot ovat Tromsøstä, VLF Porojärveltä ja Pc 3 Sodankylästä.

Vuoden 1993 havaintojen perusteella Pc 1-pulsaatioiden esiintyminen ei vielä takaa korkeataajuisen kuoron esiintymistä, mutta mikäli korkeataajuisia kuoroja on esiintynyt, on ollut poikkeuksetta myös Pc1-aktiivisuutta. Kuvassa 3.11 on esitetty korkeataajuisten kuorojen ja emissioiden sekä Pc 3- ja Pc 1-pulsaatioiden esiintyminen aamutuntien aikana marraskuun 1993 kampanjassa.

Porojärvellä 25.01.1993 havaitut kapeakaistaiset suhinat (yhteensä 15 tapausta 0700-1000 UT) ovat eräässä mielessä VLF-aaltojen kummallisuksia. Täysin vastaavia havaintoja ei ole raportoitu missään. Alustavissa tutkimuksissa on havaittu tiettyjä säännönmukaisuuksia: 1) suhinat ilmestyvät yhtä aikaa Pc 1-pulsaatioiden kanssa, 2) jokainen suhina voimistuu hyvin hitaasti (jopa kymmenen minuutin ajan sen intensiteetti on vain hieman taustakohinaa voimakkaampi), 3) intensiteetti kasvaa yllättäen huomattavasti 2-3



Kuva 3.12 Korkeataajuisia suhinoita rekisteröitynä Porojärvellä 25.01.1993 (yläpaneeli). Magneettiset pulsaatiot rekisteröitynä Ivalossa 0700-1400 UT (alapaneeli). Suhinoiden esiintymisajankohta merkitty yhtenäisellä viivalla ja yläpaneelin aikaväli katkoviivalla.

minuutissa, 4) intensiteetin kasvuun liittyy aina taajuuden kasvu ($\Delta f_{mean} \sim 0,5\text{-}1 \text{ kHz}$ 2-3 minuutissa), jonka jälkeen ilmiö häviää, 5) suhinoiden keskimääräinen taajuus kasvaa jokaisen tapauksen jälkeen ($\Delta f_{mean} \sim 0,3\text{-}0,5 \text{ kHz}$), 6) intensiteettimaksimit toistuvat noin 10 minuutin välein, 7) 0-2 kHz suhanan keskitaajuus kasvaa 0,75 kHz:stä 1,6 kHz:iin välillä 0700-1000 UT ja intensiteettimaksimit ovat samanaikaisia kapeakaistaisten suhinoiden intensitettimaksimien kanssa ja 8) ilmiöihin ei näytä liittyvän mitään liipaisijaa tai muuta ulkoista aiheuttajaa.

Kuvassa 3.12 on esitetty 0745-0815 UT aikana havaitut neljä korkeataajuista suhinaa. Mahdollisesti 8-bittisestä digitoinnista johtuen suhinoiden alkamista ei voida erottaa kuvassa. Edellä luetellut kahdeksan kohtaa voidaan nähdä myös esimerkkikuvassa. Mag-

neettiset pulsaatiot alkavat noin 0700 UT, jolloin havaitaan ensimmäinen kapeakaistainen suhina (1). Esimerkiksi suhina, jonka intensiteettimaksimi on ~0800 UT, ilmestyy heikonna jo ~0750 UT (2). Kyseisen suhanan intensiteetti ja taajuus kasvavat nopeasti ~0800-0802 UT, jonka jälkeen suhina häviää (3-4). Noin kymmenen minuutin välein toistuvien maksimien taajuus kasvaa noin 0,5 kHz esimerkkikuvan aikana (5-6). Heikoimmin kuvasta 3.12 havaittava piirre liittyy 0-2 kHz:n kaistaan. Kuitenkin myös matalataajuisten suhanan keskitaaajuus kasvaa hieman ja suhina voimistuu yhtä aikaa kapeakaistaisten suhinoiden kanssa (7). Kuvassa 3.12 ei ole havaittavissa mitään ilmiötä, joka liipaisisi suhinat (8). Ainoa yhteys liittynee magneettisiin pulsaatioihin ja niiden spektrumuotoon. Kuvassa 3.12 on esitetty myös magneettiset pulsaatiot Ivalossa 0700-1400 UT.

Joissakin tilanteissa magneettisten Pc 1-pulsaatioiden ja VLF-aaltojen välinen yhteys on voitu havaita täysin kiistattomasti. Esimerkiksi kuvassa 3.13 esitetty noin kahden tunnin mittainen ajanjakso 20.01.1993, jolloin 0,8-2,5 kHz:n ja 4,5-7,1 kHz:n kaistoilla VLF-emissioiden esiintyminen liittyy selvästi 0,3-1,5 Hz:n taajuuskaistan pulsaatioihin.

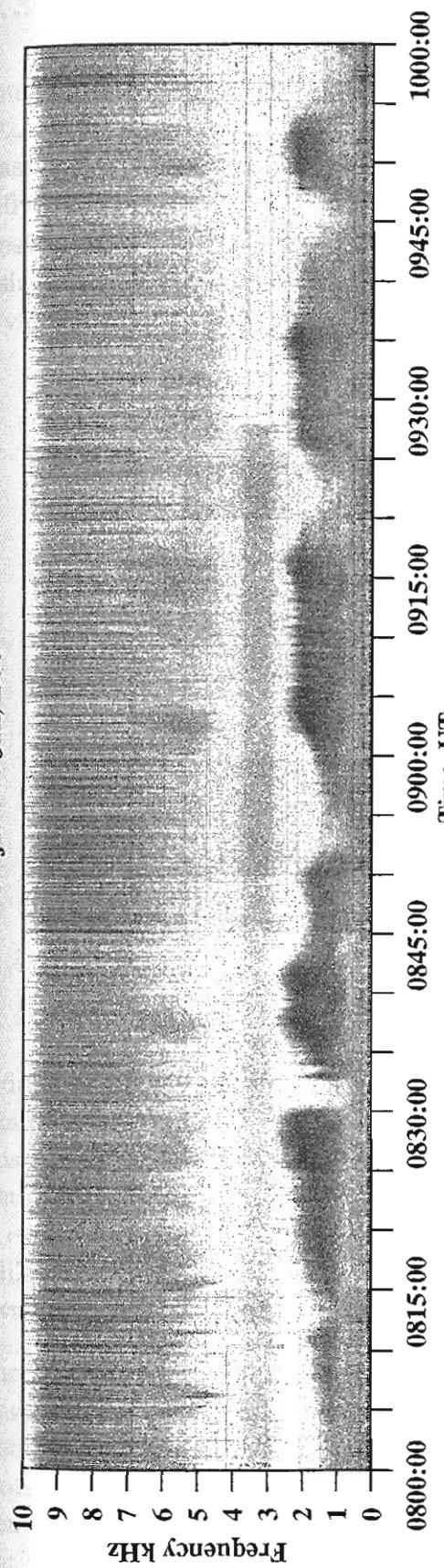
Kyseisessä tapauksessa ei voitane puhua sananmukaisesti Pc-tyyppisistä pulsaatioista, mutta esiintymisajankohdan ja taajuuskaistan osalta ne sijoittuvat Pc 1-kaistalle. Esimerkiksi pulsaatiopurskeiden erikoinen dispersio on merkillepantavaa. Näitä pulsaatioita on havaittu hyvin harvoin, mikä saattaa osaltaan vaikuttaa Pc 1-tyyppisten pulsaatioiden ja VLF-aaltojen harvinaiseen korrelaatioon. Kuvan 3.13 tapauksessa alemman VLF-kaistan intensiteettimaksimit sattuvat yhteen pulsaatiomaksimien kanssa, vaikkakaan intensiteettiarvot eivät sinällään korreloivat kovinkaan hyvin. Sen sijaan selvä yhteys voidaan havaita pulsaatiopurskeiden ja alemman VLF-kaistan ylärajataajuksien välillä. Ylärajataajuuskien suhde (f_{VLF}/f_{ULF}) on ~1700-2000, jolle välille sattuu esimerkiksi protonin ja elektronin massojen suhde. Aaltojen syntyy viittavien hiukkasten energioista tarvitaan kuitenkin vielä lisätietoa. Lisäksi pitää ottaa huomioon intensiteettimaksimien välinen viive, joka on tässä tapauksessa suurehko (~100 s).

Ylemmällä VLF-kaistalla jopa spektrumuodot ovat lähes identtisiä pulsaatioiden kanssa. Taajuuksien välillä ei nyt havaita yhtäläisyysyksiä. Sen sijaan intensiteetit näyttävät korreloivan, sillä esimerkiksi heikoimpiin pulsaatiopurskeisiin ei liity havaittavaa emissiopursketta ylemmällä VLF-kaistalla. Intensiteettimaksimien aikaero on hyvin suuri (~200 s).

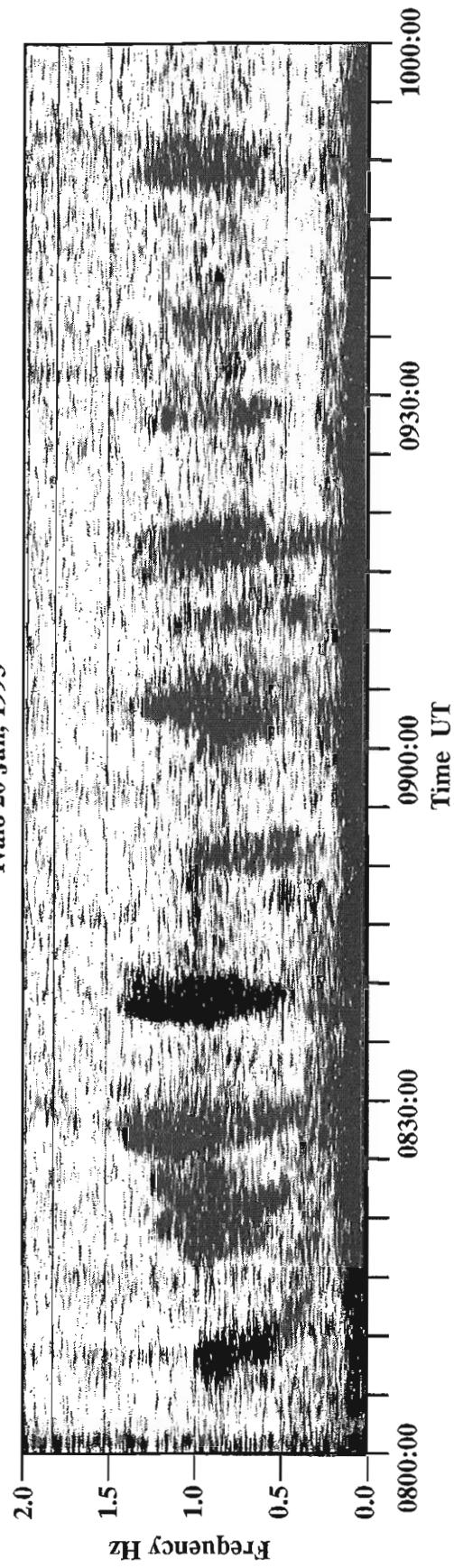
Vaikka edellä kuvattujen VLF-kaistojen (0,8-2,5 kHz ja 4,5-7,1 kHz) ilmiöt eivät näytäkään liittyvän PLHR:iin, niiden välissä on kaista (2,9-3,8 kHz), jota kontrolloi täysin PLHR. Kyseisen kaistan intensiteetti ei seuraa ollenkaan pulsaatioiden vaihtelua, vaan se pysyy lähes täysin vakiona. Ilmiön alku liittynee SSC:hen 19.01.1993 1021 UT (kuvassa 3.6). Kuitenkin noin 0927:30 UT ilmiö häviää kokonaan ilman selvää ulkoista syytä. Kyseiselle kaistalle jää tämän jälkeen vain PLHR.

Kuvan 3.13 tapauksessa on paljon mielenkiintoisia piirteitä, jotka vaativat jatkotutkimusta. Kyseessä on havainto, jollaista ei ole esitetty aiemmin.

Porojärvi 20 Jan, 1993



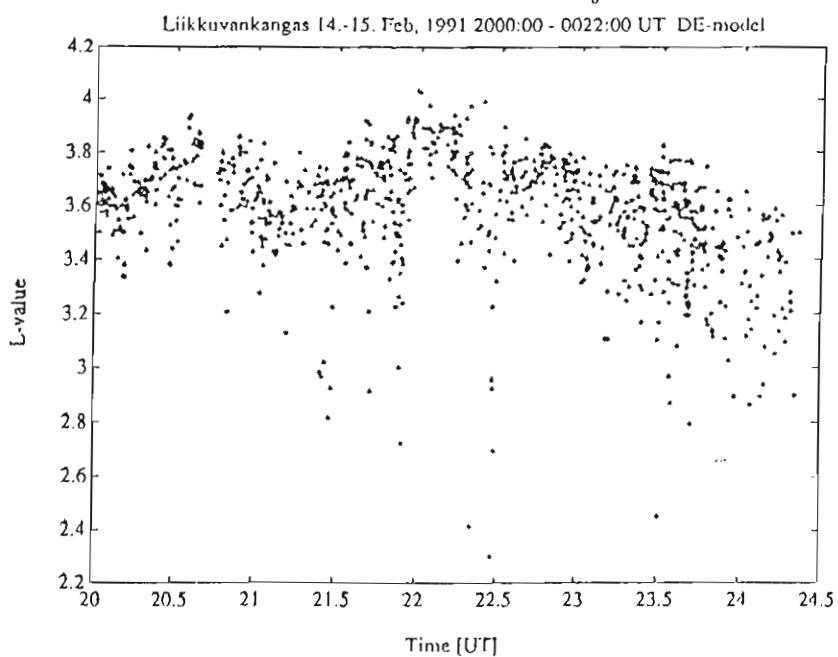
Ivalo 20 Jan, 1993



Kuva 3.13 Noin kahden tunnin rekisteröinnit sekä VLF- että Pc 1-taajuusilta 20.01.1993. Varsinkin 4,5-7,1 kHz:n VLF-ilmiöt näyttävät liittyyvän 0,3-1,5 Hz:n pulsaatioihin. Huomaa pulsaation dispersiot.

3.3 Vihellykset ja revontulialimyrsky

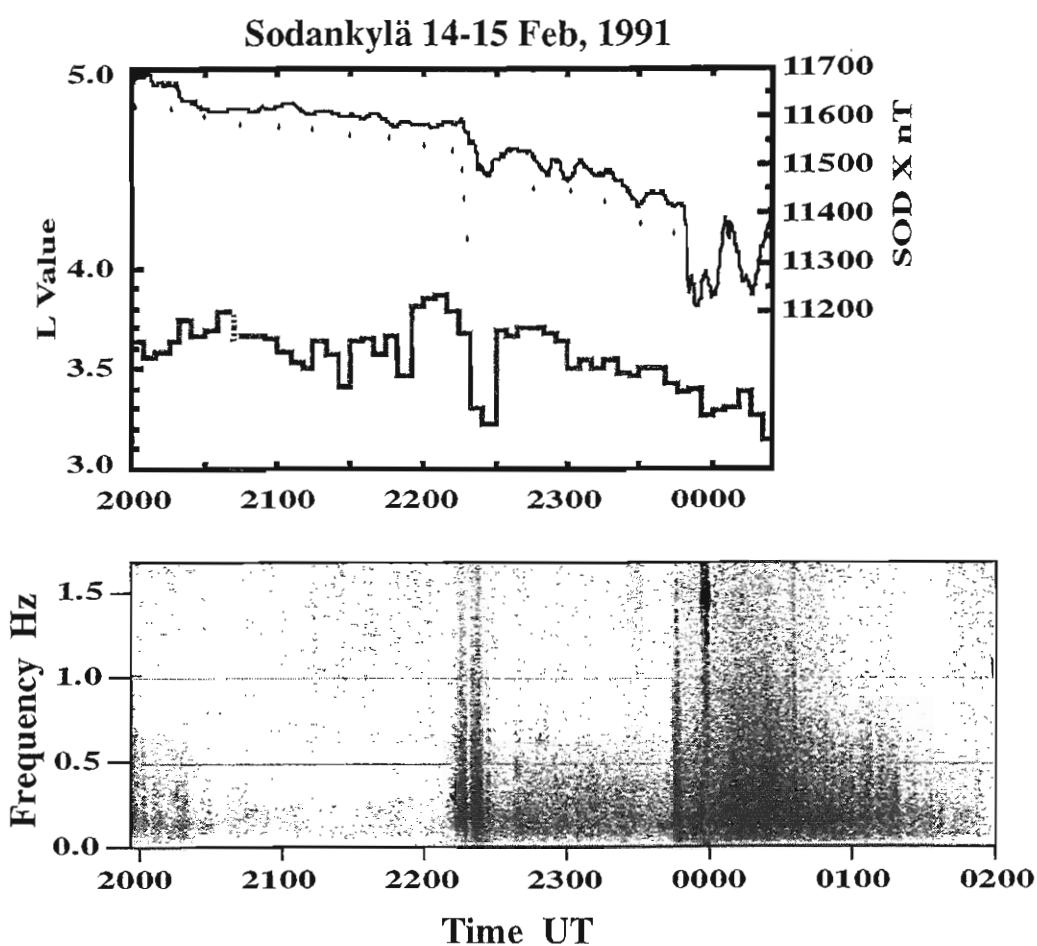
Suurin osa vihellyksistä etenee plasmapausin sisäpuolella tai plasmapausissa (INAN and BELL, 1977), jolloin niiden etenemistie on altiina kaikille häiriöille, jotka vaikuttavat plasmapausin sijaintiin. Tällainen häiriö on esimerkiksi revontulialimyrsky. Mikäli vihellyksiä pystytään rekisteröimään paljon lyhyessä ajassa, voidaan niitä käyttää tutkittaessa magnetosfäärin parametrien muutoksia alimyrskyn aikana. Koska ionosfäärin prosessit vaikuttavat VLF-aaltojen etenemiseen maanpinnalle, voidaan vihellyksiä käyttää - hyväksi myös tutkittaessa revontulien vaikutusta aalojen etenemiseen ionosfäärissä.



Kuva 3.14 Vihellysten etenemisteiden sijainti 2000–0030 UT. Jokainen piste kuvaa yhden vihellyksen L -arvoa. (MANNINEN and TURUNEN, 1993)

Sodankylässä 15. helmikuuta 1991 rekisteröitiin yli tuhat vihellystä seitsemän tunnin aikana (1930–0230 UT). Näistä on analysoitu ne 860 vihellystä, jotka olivat riittävän intensiivisiä spektrimuodon löytämiseksi. Analyysi tehtiin käyttäen TARCSAIN (1975) sovitusta diffuusille tasapainomallille (plasmapausin sisäpuolininen eteneminen). Kuvassa 3.14 on esitetty vihellysten etenemisteiden L -arvot neljän ja puolen tunnin aikana. Hajonta on välillä $L=2,4$ – $4,0$, mutta suurin osa niistä on keskittynyt välille $L=3,5$ – $3,9$. Vastaavasti ekvaattorialueen elektronitiheydet etenemistiellä vaihtelivat välillä 400 – 700 cm^{-3} .

Kun vihellysten etenemisteiden liikettä verrataan magneettikentän X-komponentin vaihteluun Sodankylässä ja revontulikaaren liikkeisiin, näiden käyttäytymisessä havaitaan yhteneevyyttä 2210 UT jälkeen (kuva 3.15). 2214 UT revontulet aktivoituvat ja kirkastuvat huomattavasti, kuten revontulialimyrskyn laajenemisvaiheeseen kuuluukin. Vihellysten etenemisteiden L -arvon voimakkain muutos liittyy nimenomaan alimyrskyn alkuun, mikä johtunee plasmapausin sijainnin muuttumisesta ko. aikana. Yhtä radikaalia käyttäytymis-



Kuva 3.15 a) Vihellysten L -arvo (alin käyrä), magneettikentän X-komponentti Sodankylässä (ylin käyrä) ja TV-kuvasta määritetty revontulen eteläreuna (pisteet) (MANNINEN and TURUNEN, 1993). b) Magneettiset pulsaatiot Sodankylässä. Alimyrskyt voidaan havaita selvästi.

tä ei voida havaita 2345 UT, mikä saattaa johtua magneettisen aktiivisuuden tasosta kahden alimyrskyn välillä. Toisaalta jälkimmäinen alimyrsky alkaa vasta paikallisen keskiön jälkeen, jolloin aktiivinen alue on kaukana länessä rekisteröintipaikkaan varrattuna.

Esitetty vihellysten likimääriäinen L -arvo on saatu etsimällä 5 minuutin jaksoista ne etenemistiet, missä ekvatoriaalinen elektronitiheys $N_e = 400 \text{ cm}^{-3}$. Tällaisen määrittelyn käyttäminen on perusteltua, kun tutkitaan plasmapausissa tai juuri sen sisäpuolella olevia etenemisteitä.

BLOCK and CARPENTER (1974) ovat esittäneet metodin ekvatoriaalisen sähkökentän laskemiseksi revontulialimyrskyn aikana vihellysten etenemistien liikkeiden avulla. Teoria pe-

rustuu vihellyksen nenätaajuuden ja elektronin minimigyrotaajuuden väliseen yhteyteen. Nenätaajuuden muuttuessa 1 Hz/s sitä vastaa 1 mV/m sähkökentän muutos, kun $L=5$. Näin CARPENTER and SEELY (1976) ovat pystyneet laskemaan niinkin pieniä kenttiä kuin 0.05 mV/m. Vaikka Sodankylän rekisteröinneistä vihellyksiä analysoitiinkin 860 noin neljän ja puolen tunnin ajalta, niiden etenemisteiden liikkeestä ei voitu laskea ekvatoriaalista sähkökenttää. MANNINEN and TURUNEN (1993) ovat esitettäneet yksityiskohaisemman kuvaukseen Sodankylässä rekisteröidystä tapauksesta (Liite B4).

3.4 Ihmisen vaikutukset VLF-aaltoihin

VLF-aaltojen syntyn ja muokkautumiseen vaikuttaa aurinkotuulella tapahtuvien prosessien, revontulien sekä maanpinnalla vallitsevan sään ohella myös ihmisen oma maapäällinen aktiiviteetti. Magneettiset häiriöt vahvistavat omalta osaltaan ihmisen tuottamien signaalien vaikutuksia (esimerkiksi HAYASHI *et al.*, 1978). Radiolähetysten kuulumiseen VLF-taajuuksilla vaikuttaa CANNONIN (1982) mukaan merkittävästi magneettinen aktiivisuus, mutta kuitenkin niin, että radiolähetyksiä ei ole kuultu rauhallisina eikä hyvin häiriöisinä aikoina.

3.4.1 Verkkoharmoniset (PLHR)

Voimalinjoista säteilee avaruuteen yliaaltoja (50 Hz:n harmoniset), jotka hetkittäin näytävät olevan lähes hallitsevia VLF-alueen aaltoja ja siten osaltaan muokkaavat avaruuden hiukkaspopulaatioita (ks. kuvat 3.4 ja 3.5). Suomen, Ruotsin ja Norjan pohjoisosat sekä Kuolan alue ovat eräitä niistä harvoista alueista, joilla energian kulutus on suuri juuri revontulialueen alapuolella. Havaittuja 50 ja 60 Hz:n harmonisia ovat tutkineet esimerkiksi HELLIWELL *et al.* (1975), BULLOUGH *et al.* (1976), PARK (1977), TATNALL *et al.* (1978) ja TOMIZAWA and YOSHINO (1985).

Sähkörautateiden aiheuttamat harmoniset ylivärähtelyt ovat yksi mielenkiintoisimmista VLF-alueen ilmiöistä. Suomen Lapissa mitattuna kyseeseen tulevat lähinnä Suomen, Ruotsin tai Venäjän rautatiet. Havaittu harmonisten taajuusero (noin 83 Hz) voi kuitenkin olla peräisin vain Ruotsin sähkörautateistä, koska se on lähialueella ainoa, jossa käytetään perustaaajuutena $16 \frac{2}{3}$ Hz:iä. Tällöin havaitsemamme taajuusero on viisi kertaa perustaaajuus. Kyseessä voisi olla Kiiruna-Narvik-rata, jolla kuljetetaan noin 60 000 tonnia malmia joka päivä. Tällaisen malmimääärän kuljettaminen vaatii hyvin suurta sähkötehonkäyttöä, joka aiheuttaa epälineaarisisissa prosesseissa paljon voimakkaita harmonisia.

Rautateiden aiheuttamat harmoniset ylivärähtelyt ovat todennäköisesti edenneet ensin eteläiselle pallonpuoliskolle pitkin maan magneettikenttää ja palanneet sitten takaisin. Samalla signaalit vahvistuvat ja väistämättä ottavat energiaa avaruuden hiukkasilta,

jotka näin joutuvat uusille radioille. Tällöin harmonisten intensiteetti voi vahvistua jopa 100 000-kertaiseksi verrattuna perustajauuden intensiteettiin (BULLOUGH *et al.*, 1976 ja TATNALL *et al.*, 1978). Toisaalta kyseessä voi olla myös yliväähelyjen eteneminen pitkin sähköverkkoa, jolloin nämä häiriöt saattavat joutua Suomen sähköverkkoon. Tällöin havaitsemamme harmoniset voivatkin olla peräisin Suomen valtakunnan sähköverkosta. Kuitenkaan havaittu taajuusero ei voi aiheutua normaalista 50 Hz:n vaihtosähköstä.

Joissakin tapauksissa (esimerkiksi kuva 3.4) verkkoharmonisten taajuus hyppää sekunnissa jopa muutamia kymmeniä hertsejä ylös- tai alas päin. Yleensä PLHR:n taajuus kasvaa hitaasti (muutamia hertsejä minuutissa). Yksittäiset harmoniset voivat myös "vaihtaa" intensiteettejään keskenään. Siis voimakkain harmoninen näyttää "sammuvan" yhtäkkiä ja jokin toinen harmoninen ottaa voimakkaimman roolin. Tarkemmin tutkittaessa ensimmäinen harmoninen ei olekaan päättynyt, vaan sen intensiteetti onkin pienentynyt jopa kymmeniä desibelejä. Näitä piirteitä ei ole yleensä käsitelty. PARROTIN (1994) artikkelissa on kuva, jossa AUREOL-3-satelliitilla havaituissa PLHR:ssa esiintyy muutamien kymmenien sekuntien välein äkillisiä taajuushyppyjä. PARROT (1994) jättää kuitenkin kyseiset hypyt kokonaan käsittelemättä.

Teollisuuden aiheuttama sähkömagneettinen säteily on peräisin muun muassa terästehtaiden valssamoista, joissa käytetään suuria tehoja ja VLF-taajuisia radiosignaleja teräksen sulattamiseen. Myös sulatetun teräksen puristaminen muottiin vaatii suuria tehoja normaalista sähköverkosta, jolloin aiemmin mainitun kaltaiset voimalinjojen harmoniset yliväähelyt lisääntyvät.

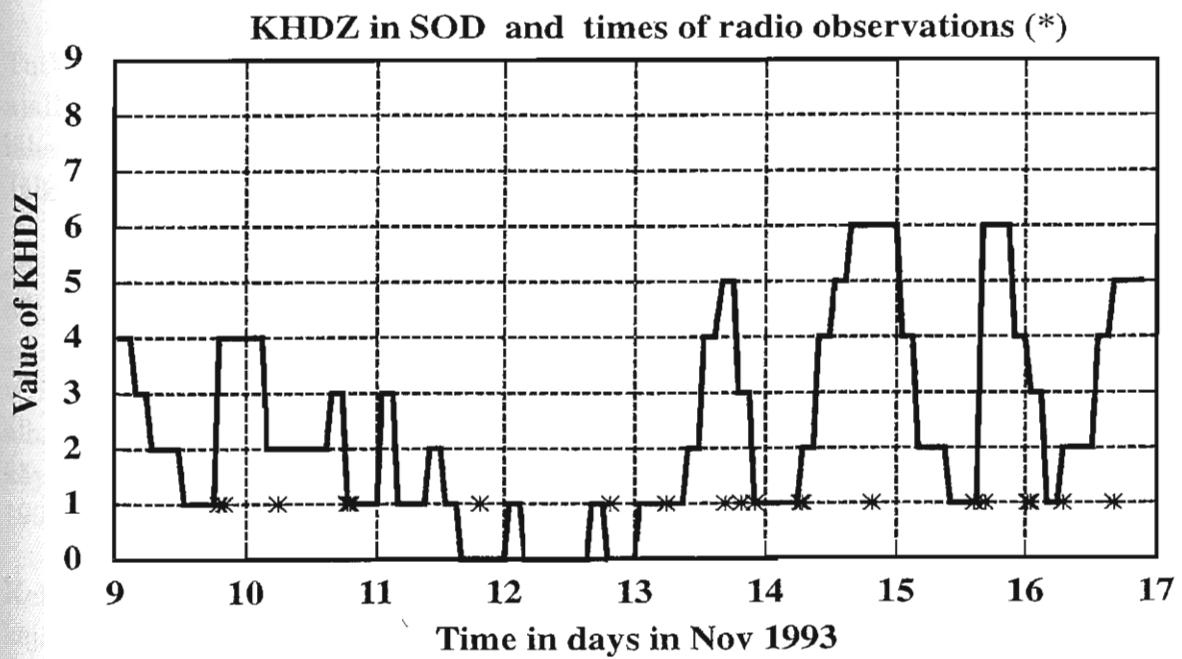
Yleensä PLHR:n yhteydessä käsitellään vain potentiaalisia säteilyn lähteitä tai aaltohiukkasvuorovaikutusta magnetofääriissä, mutta samalla unohdetaan ionosfäärin prosessit. Kun tarkastellaan eri hiukkasten gyrotaajuuksia ionosfääriissä 100 km:n korkeudella, havaitaan, että happi- ja typpi-ionien (O^+ ja N^+) gyrotaajuudet ovat noin 48 Hz ja 55 Hz, kun magneettivuon tiheydeksi oletetaan $50 \mu\text{T}$. Mikäli tarkastellaan O_2^+ :aa ja N_2^+ :aa, gyrotaajuuksiksi saadaan noin 24 Hz ja 27 Hz. Kummassakin tapauksessa taajuudet ovat lähellä PLHR:n perustajauksia. Luonnollisesti eri korkeudella ja eri magneettivuon tiheyksillä arvot ovat hieman erilaiset.

3.4.2 Radiolähetykset

Sähkölinjojen säteilyn lisäksi on havaittu muitakin ihmisen tuottamia VLF-alueen ilmiöitä. Tällainen on esimerkiksi voimakkaan amplitudimoduloidun radiolähetyksen kuuluminen VLF-taajuusalueella. Ensimmäisiä havaintoja radiolähetysten kuulumisesta VLF-taajuuksilla ovat esittäneet LAASPERE *et al.* (1969) sekä LAASPERE and JOHNSON (1973). He esittivät, että demodulaatio voi tapahtua satelliittivastaanottinantennia ympäröivässä plasmassa, jos plasmataajuus on lähellä kantoaallon taajuutta.

TURUNEN *et al.* (1980) ja CANNON (1982) havaittivat venäläisten LF- ja MF-lähetysten aikamerkkipiiejä VLF-rekisteröinneissään. Varmasti tunnettu prosessi on radioaallon aiheuttamasta elektronilämpötilaavaihtelusta ja ionosfäärin sähkövirroista johtuva demodulaatio D- ja E-kerroksessa. CANNON *et al.* (1982) on esittänyt neljä mallia, miten radiolähetyksessä voi vuorovaikuttaa revontulielektrojetin kanssa ja näin demoduloitua. Toistuvasti suomalaisissa mittauksissa on kuitenkin saatu viitteitä siitä, että täytyy olla vielä jokin muu tuntematon mekanismi, joka saa avaruuden toimimaan luonnollisena radiovastaanottimena.

Perinteinen kuumennusmekanismi demodulaation aiheuttajana hallitaan (esimerkiksi TURUNEN *et al.*, 1980; CANNON *et al.*, 1982), mutta se ei voi selittää tiettyjä erityispiirteitä, kuten lähetysten taajuus (noin 6 MHz), asemaselektiivisyys, polarisaatiovaihtelu, signaalin voimakkuus (havaittu signaali ei useinkaan ole voimakkain radiolähetyksessä), havainnon kestoaika (yleensä muutamia sekunteja) ja lähetteen kuluminen yhdessä luonnon omien VLF-ilmiöiden ja magneettisen aktiivisuuden aikana. Lähetykset sisältävät yleensä vain selkeitä ääniä, kuten klassista musiikkia tai uutisia. Varsinaista Rock'n Rollia ja Heavy Metalia ei ole havaittu lainkaan. Kuvassa 3.16 on esitetty marraskuun 1993 mittauskampanjan aikana havaittujen lähetysten kuuluvuuden liittymisen magneettiseen häiriöisyyteen. Siitä voi päätellä, että useimmat lähetysten on havaittu aikoina, jolloin magneettisessa aktiivisuudessa on tapahtunut jokin muutos. Pitää kuitenkin ottaa huomioon, että K_{HDZ} on kolmen tunnin indeksi ja radiolähetysten



Kuva 3.16 Radiolähetysten havaitsemisajat (merkitty tähdillä) verrattuna Sodankylän magneettiseen K_{HDZ} -indeksiin 9.-17.11.1993.

kuuluvuus on ollut yleensä vain muutamia sekunteja. Tarvitaan vielä lisätutkimuksia ennen, kuin yhteys magneettisen aktiivisuuden muutoksiin voidaan todeta vakuuttavasti.

Radiolähetykset ovat peräisin Venäjältä, Englannista, Saksasta, Norjasta, Ruotsista, Vatikaanista, Israelista ja Suomesta. OIKARINEN (1993) on esittänyt muutamia esimerkkejä Suomessa rekisteröidyistä tapauksista. Tyypillisesti radiolähetyksien kuuluvuus on ollut korkeintaan muutamia minuutteja ja useimmissa tapauksissa ne liittyvät muuhun VLF-aktiviteettiin tai magneettisiin häiriöihin. Täydellistä korrelaatiota esimeriksi magneettisten pulsaatioiden kanssa ei ole havaittu. Se ei kuitenkaan estää, etteikö demodulaatio olisi seurausta magneettisen pulsaation aiheuttamasta magneettikentän mikroskoopista vaihtelusta.

3.4.3 Tutkalähetteet ja muut keinotekoiset signaalit

Voimakkaiden tutkalähetteiden on arveltu vaikuttavan myös VLF-alueella. Tapauksista ei ole varmaa havaintoa, mutta kevään 1992 aikana Pohjois-Suomessa tehdyissä mittauksissa on rekisteröity merkillisiä signaaleja. Ne saattaisivat olla peräisin jonkinlaisista tutkista, mutta toistaiseksi ei ole tietoa mahdollisen lähteen sijainnista. Kyseessä on kuitenkin erittäin voimakas signaali, jonka spektrit kahdessa ortogonaalikomponentissa ovat täsmälleen toistensa vastakohtia. Eli jos NS-komponentissa on voimakas lähete jollakin taajuudella, niin EW-komponentissa vastaava taajuus on täysin tyhjä.

Tutkasignaalien esiintymisessä ei näytä olevan minkäänlaista säännönmukaisuutta, ei ajallista eikä paikallista. Ainoat yhteiset tekijät ovat taajuus ja ilmiön esiintyminen lähes täsmälleen samaan aikaan venäläisen APEX-satelliitin Suomen ylityksen kanssa. Jälkimmäinen voi tosin olla vain sattumaa.

Joissakin tapauksissa Pohjois-Suomessa on rekisteröity VLF-lähetteitä, jotka ainakin venäläisten tutkijoiden mielestä ovat sikäläisten sukellusveneiden viestiliikennettä joko toisiin sukellusveneisiin tai maatukikohtaan. Tavanomaiset radiotaajuudet eivät sovellu vedenalaiseen viestiliikenteeseen, koska niiden tunkeutumissyyvys on hyvin pieni. Mitä alhaisempi taajuus, sitä syvemmälle voidaan kommunikoida. Tässä viestiliikenteessä on käytetty niinkin alhaisia taajuuksia kuin 50 Hz. (keskustelut Dr. I. Kornilovin kanssa, 1991.)

Keinotekoiset signaalit voivat synnyttää myös liipaistuja emissioita. Tyypillisiä esimerkkejä ovat VLF-lähettimien ja voimalinjojen ylivärähtelyjen aiheuttamat emissiot. Tutkituimmat VLF-lähetinsignaalit ovat NAA (14,7 kHz) ja OMEGA (10,2 kHz) (esimeriksi HELLIWELL *et al.*, 1964). HELLIWELL *et al.* (1975) tutkimusten jälkeen ihmisen aiheuttamien signaalien vaikutuksia on tutkittu aktiivisesti (esimeriksi *Space Sci. Rev.* vol 35, 1983, nro 1 ja 2 kokonaan; TOMIZAWA and YOSHINO, 1984 ja 1985).

3.5 Yhteenveto havainnoista

I. Magneettisiin impulsseihin liittyvät VLF-ilmiöt

Vuosina 1990-1993 on Suomessa rekisteröity seitsemän VLF-suhinatapausta, jotka liittyytä magneettiseen impulssiin. Lisäksi yksi jätiläispulsaation aiheuttama tapaus, joka on samankaltainen SI- ja SSC-tapausten kanssa. Yleisesti ottaen havainnot ovat samanlaisia: kaikkiin liittyy voimakas suhanan taajuus- ja intensiteettimuutos, ja kaikki suhat vaimenevat taustakohinan tasolle muutamassa minuutissa (kuvat 3.1-3.7). Omat havainnot ja japanilaisten vuoden 1966 havainnot yhdistämällä on saatu VLF-suhinan taajuudenmuutosasteen ja magneettisen impulssin voimakkaiden välille yhteys, joka kattaa nyt magneettivuon tiheysmuutokset välillä -20–350 nT (aiemmin vain -20–50 nT).

II. Magneettisiin pulsaatioihin liittyvät VLF-ilmiöt

VLF-aallot voivat moduloitua magneettisten pulsaatioiden vaikutuksesta. Voimakkaimmin modulaatio esiintyy Pc 3–4-pulsaatioiden yhteydessä. Omista tapauksista on esitetty vain kuva 3.9, mutta samanlaisia havaintoja on tehty myös vuonna 1994.

Mielenkiintoisia VLF-ilmiöitä ovat vihellysten liipaisemat korkeataajuiset kuorot (kuva 3.10), joita on rekisteröity yhden päivän aikana 259. Kaikkiaan tapauksia lienee lähes tuhat, mutta analysointi on vielä kesken. Näiden ilmiöiden synty saattaa liittyä aaltojen ja Pc 1–2-pulsaatioiden vuorovaikutukseen (kuva 3.11). Samankaltainen kummallisuuus on korkeilla VLF-taajuuksilla esiintyvä kapeakaistainen suhina (kuva 3.12), joita ei ole havaittu missään muualla.

Eräässä mielessä todiste magneettisten Pc 1-taajuisten aaltojen ja VLF-aaltojen välisestä yhteydestä on esitetty kuvassa 3.13. Kyseisessä tilanteessa taajuuskaistojen 0,8–2,5 kHz ja 4,5–7,1 kHz VLF-ilmiöt liittyvät laajakaistaisiin Pc 1-taajuusalueella esiintyviin pulsaatioihin. Varsinkin ylempi VLF-kaista on lähes identtinen dynaamisen ULF-spektrin kanssa.

III. Vihellykset ja revontulialimyrsky

Helmikuussa 1991 yhtenä yönä rekisteröityjen 860 vihellyksen etenemisteiden käyttäytymisessä havaittiin yhtäläisyksiä revontulien eteläreunan liikkeiden kanssa (kuvat 3.14 ja 3.15). Ilmiö liittyyne plasmapausin sijainnin muuttumiseen revontulialimyrskyn aikana.

IV. Ihmisen vaikutukset VLF-aaltoihin

Magneettisten häiriöiden yhteydessä ihmisen energiankulutuksen aiheuttamat VLF-aallot (verkkoharmoniset, PLHR) voimistuvat. Sähkörautateiden aiheuttamat harmoniset (~ 83 Hz) lienevät lähtöisin Pohjois-Ruotsista (kuvat 3.3 ja 3.4).

Lyhytaaloradiolähetysten on havaittu kuuluvan toisinaan VLF-mittauksissa. Niiden esiintyminen sattuu yleensä magneettisen aktiivisuuden muutoksen yhteyteen (kuva 3.16). Tyypillisesti radiolähetyksien kesto on korkeintaan muutamia minuutteja ja useimmissa tapauksissa ne liittyyvät muuhun VLF-aktiviteettiin.

4. VLF-EMISSIONOIDEN TEORIAA

Diskreetit emissiot aiheuttavat lukuisia mitattavissa olevia ilmiöitä, joten niitä voidaan käyttää kuvaamaan vuorovaikuttavien hiukkasten ominaisuuksia. Tämä on hyvin merkitävä käytökohde esimerkiksi vihellyskanavien tutkimuksessa, johon satelliittien käyttö on vaikeaa niiden suuren nopeuden vuoksi. Vastaavia syitä ovat esimerkiksi VLF-emissioiden aiheuttama presipitaatio ionosfääriin ja ehkä mahdollisuus käyttää niitä elektronitiheyden mittaamiseen magnetosfääriissä ja ionosfääriissä. Havainnot VLF-aaltojen liittymisestä yhä suuremmassa määrin verkkoharmonisiin vaatii myös perusteorioiden hallitsemista. Mikäli emissioiden esiintymistä voitaisiin ennustaa nykyistä paremmin, siitä hyötyisi esimerkiksi VLF-taajuuksia käyttävä viestiliikenne.

VLF-emissioiden teorioiden pitäisi pystyä selittämään vihellysmoodin aaltojen eteneminen sekä t, f -spektri ja intensiteetti. Kuitenkin mittausaineistoissa on ilmiötä, joiden teoreettinen tarkastelu nykyisillä metodeilla ei vielä ole mahdollista. Alkuun joidenkin spektrumuotojen selitettiin syntyvän yksittäisten ajautuvien (driftaavien) hiukkasten säteilystä tai yksinkertaisesta hiukkas-aaltovuorovaikutuksesta. Myöhemmin emissioiden intensiteettien on todettu olevan paljon suurempia kuin hiukkasten säteilyn aiheuttama. Lisäksi spektrumuodot ovat usein hyvin monimutkaisia. Etenemisen ja sen vaikuttuksien arvioiminen havaittuihin spektrumuotoihin riippuu lisäksi oletetun syntyalueen sijainnista.

HELLIWELL (1967) on esittänyt teorian diskreettiemissioiden ja koukkujen syntymiselle. Se sisältää hyödyllisiä osia esimerkiksi vihellyksen liipaisemien korkeataajuisten kuorojen yhteydessä. Toisaalta diskreettiemissioiden ja suhinan uskotaan syntyvän eri mekanismeilla, mutta luvussa 3 on esitetty joitakin ilmiötä, joiden yhteydessä eri syntymekanismit saatetaan asettaa kyseenalaiksiksi. Siis, vaikka maanpinnalla on havaittu suhinaa, se voi kenties kuitenkin olla alkuaan diskreeteistä emissioista koostuva kuoro, mutta pitkästä etenemistiestä johtuen kokenut dispersioita ja näin muovautunut suhinaksi. Tästä syystä teorian pääkohtia on tarkasteltu kohdassa 4.3.7.

4.1 Etenemismoodit

Tutkittaessa plasmassa esiintyviä aaltojen etenemismoodeja on käytännöllistä jakaa aallot kahteen tyyppiin: sähkömagneettisiin ja sähköstaattisiin. Tavallisesti sähkömagneettisen aallon etenemisnopeus on paljon suurempi kuin terminen nopeus plasmassa. Tästä syystä sähkömagneettisen aallon etenemistä voidaan kuvata mallilla, jossa plasma oletetaan täysin kylmäksi. Vastaavasti sähköstaattisten aaltojen etenemisnopeus on lähes aina hiukkasten termisen nopeuden luokkaa. Tämän vuoksi sähköstaattisten aaltojen analyssissä on otettava huomioon lämpöefektit. (GURNETT, 1991).

4.1.1 Appleton-Hartreen yhtälö

Sähkömagneettisten aaltojen ominaisuuksia voidaan tarkastella magnetoionisen teorian avulla. Vaikka se ei otakaan huomioon hiukkasten lämpöliikettä eikä ionien vaikutusta, sen avulla voidaan johtaa sähkömagneettisen aallon dispersioyhtälö magnetoituneessa plasmassa. Tätä yhtälöä kutsutaan Appleton-Harteen yhtälöksi. Ottamalla kyseinen yhtälö tarkastelun pohjaksi, voidaan siihen lisätä myös ionien vaikutukset, kuten myöhemin havaitaan.

Tarkastelua varten määritellään magnetoioniset parametrit X , \mathbf{Y} ja Z yhtälöillä

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2} = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{f_p^2}{f^2} \\ \mathbf{Y} = -\frac{e\mathbf{B}}{m_e \omega} = \frac{\omega_e}{\omega} \\ Z = \frac{\nu_e}{\omega}, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

joissa ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyyys, m_e on elektronin lepomassa, ω_p on plasmataajuuus, ω_e on elektronin gyrokulmataajuuus ja ν_e törmäystaajuuus. Koska plasman oletetaan olevan törmäyksetontä, $Z = 0$.

Lähtemällä Maxwellin yhtälöistä, kun avaruusvarauksia ei ole, eli $\rho = 0$, ja sähkökentän oletetaan aiheuttavan vain siirtymävirtaa, eli $\mathbf{j}=0$

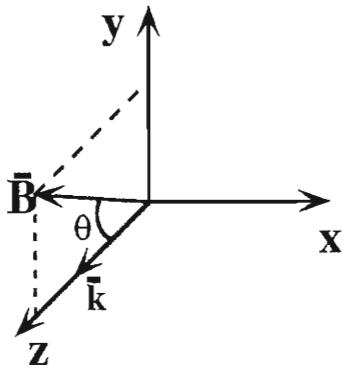
$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} & \text{(Faraday laki)} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & \text{(Amperen laki)} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \end{array} \right. \quad (4.2)$$

ja olettamalla aallon sähkökentän olevan muotoa $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp [i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$ voidaan johtaa Appleton-Hartteen yhtälö. Esimerkiksi MANNINEN (1991) on johtanut Appleton-Hartteen yhtälön yksityiskohtaisesti. Koordinaatisto on määritelty kuvassa 4.1.

Kun aaltovektorin ja magneettikentän välinen kulma on mielivaltainen, saa Appleton-Hartteen yhtälö törmäyksettömässä plasmassa muodon

$$n^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + 4Y_L^2(X-1)^2}}. \quad (4.3)$$

Yleisessä tapauksessa (kun $\nu_e \neq 0$) n^2 ja siten myös n on kompleksinen, joten merkitsemällä $n = \mu - i\chi$ aallon kenttien aika- ja paikkavaihtelu voidaan esittää seuraavasti:



Kuva 4.1 Koordinaattijärjestelmä, jota on käytetty yhtälöiden (4.3) ja (4.4) yhteydessä z-akselin suuntaan etenevälle aallolle.

$\exp[i(\omega t - kz)] = \exp[i(\omega t - \omega nz/c)] = \exp[-\omega \chi z/c] \cdot \exp[i(\omega t - \omega \mu z/c)]$. Taitekertoimen imaginaarioista siis aiheuttaa eksponentiaisen vaimennuksen aallon etenemissuunnassa.

Aallon polarisaatiolle saadaan lauseke vastaavan johdon jälkeen ja se voidaan esittää muodossa

$$P = -\frac{H_Y}{H_x} = \frac{E_x}{E_Y} = -\frac{i}{Y_L(1-X)} \left[\frac{1}{2} Y_T^2 \pm \frac{1}{2} \sqrt{Y_T^4 + 4Y_L^2(1-X)^2} \right]. \quad (4.4)$$

Heijastuspisteet saadaan ehdosta $n^2 = 0$ eli

$$\begin{cases} X = 1 & \text{valitaan } + -\text{merkki (4.3)ssa} \\ X = 1 \pm Y & \text{valitaan } - -\text{merkki (4.3)ssa.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Nollakohta $X = 1 - Y$ on mahdollinen vain, kun $Y < 1$, eli $f > f_{He}$. Tämä voidaan jättää tässä yhteydessä huomiotta, sillä tarkastelun kohteena ovat taajuudet $f < f_{He}$.

Taitekertoimella on singulariteetti kohdassa, jossa

$$2(1-X) - Y_T^2 = \pm \sqrt{Y_T^4 + 4Y_L^2(1-X)^2}, \quad (4.6)$$

eli

$$X = 1 - \frac{Y_T^2}{1 - Y_L^2} = \frac{1 - Y^2}{1 - Y_L^2}. \quad (4.7)$$

Kun tarkastellaan tilannetta $Y > 1$, taitekertoimen singulariteetti on alueessa $X < 0$, jos $|Y_L| < 1$, ja alueessa $X > 0$, jos $|Y_L| > 1$. Näistä ensin mainittu ei ole vihellysmoodin kannalta mielenkiintoinen. Kun $|Y_L|$ ohittaa arvon 1, singulariteetti siirtyy $+\infty$:ään ja pienenee tämän jälkeen kohti ykköstä. Nyt singulariteetti liittyy Appleton-Hartreen yhtälössä $+-$ merkkiin. Alueelle $X > (Y^2 - 1) / (Y_L^2 - 1)$ ilmestyy ordinaariaallon toinen haara, jolla ei ole heijastuspistettä ja jonka n^2 on aina positiivinen. Tällöin eteneminen on mahdollista myös äärettömän tiheässä plasmassa. Kyseistä moodia kutsutaan

vihellysmoodiksi. Vihellysmoodi esiintyy taajuksilla $f \leq f_{He}$ tai $f \leq f_{pe}$ riippuen siitä, kumpi taajuus on pienempi (BITTENCOURT, 1988).

4.2 Vihellysmoodin eteneminen plasmassa

Vihellysmoodi esiintyy suurilla taitekertoimien arvoilla, jolloin vaihenopeus on vastaavasti alhainen. Tyypiltään se on ordinaarimoodi ja kulmalla $\theta = 0^\circ$ polarisaatio on oikeakätiinen, jolloin aallon kenttävektori pyörii \mathbf{B}_0 :n ympäri samaan suuntaan kuin elektroni gyroliikkeessään. Kun $\theta = 0^\circ$, resonanssi ($n = \infty, v_{ph} = 0$) sattuu kohtaan $X = 1$, joka rajoittaa etenemisalueen arvoille $X > 1$. Kun θ alkaa kasvaa 0° :sta, saadaan kaavan 4.7 perusteella resonanssitaajuus yhtälöstä

$$Y = \sqrt{\frac{X - 1}{X \cos^2 \theta - 1}}. \quad (4.8)$$

Kun $n \rightarrow \infty$, saadaan elektronikaasussa θ :lle resonanssiarvo, joka yhtälön (4.8) avulla voidaan esittää muodossa

$$\theta_R = \arccos \left(\frac{X + Y^2 - 1}{XY^2} \right)^{1/2}. \quad (4.9)$$

Anisotrooppisessa väliaineessa aaltopaketti etenee eri suuntaan kuin aallon normaali. Aaltopaketin suunta on energian etenemissuunta, ja sitä kutsutaan sädesuunnaksi. Voidaan osoittaa, että sädesuunta on aina taitekerroin pinnan normaalilin suuntainen. (HELLIWELL, 1965).

4.2.1 Yleinen tapaus

Aallon etenemiseen plasmassa vaikuttaa erilaisten hiukkasten olemassa olo. Tarkastellaan ensin kahta erikoistapausta, jotka ovat magneettikentän suuntainen (pitkittäinen) ja sitä vastaan kohtisuora (poikittainen) eteneminen. Tällöin saadaan yleisen tapauksen molemmat äärirajat selville, jonka jälkeen eteneminen suuntiin $0^\circ < \theta < 90^\circ$ asettuu näiden erikoistapauksien väliin. Jos ionien vaikutus otetaan huomioon, taitekerroin pitkittäiselle etenemiselle on

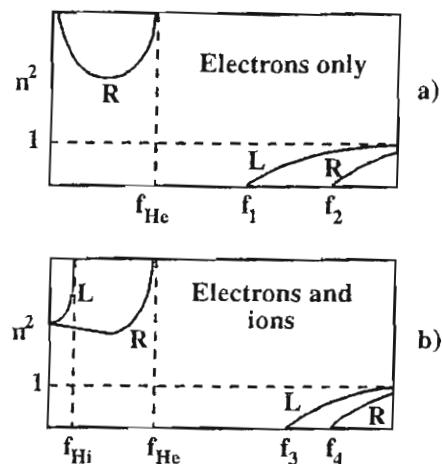
$$n^2 = 1 - \frac{X_e}{1 \pm Y_e} - \frac{X_i}{1 \mp Y_i}, \quad (4.10)$$

joka saadaan Appleton-Hartreen yhtälöstä, kun $Y_T = 0$, $X = X_e + X_i$ ja $Y_i = (m_e/m_i)Y_e$. Se voidaan kirjoittaa myös muotoon

$$n^2 = 1 - \frac{f_p^2}{(f \pm f_{He})(f \mp f_{Hi})}, \quad (4.10')$$

missä $f_p^2 = f_{pe}^2 + f_{pi}^2$, kun muistetaan, että $f_{pe}^2/f_{pi}^2 = m_i/m_e = f_{He}/f_{Hi}$.

Kun yhälössä (4.10') valitaan ylemmät merkit, taitekertoimella on singulariteetti taajuudella $f = f_{Hi}$. Vastaavasti valittaessa alempat merkit singulariteetti on taajuudella $f = f_{He}$. Kuvassa 4.2 on esitetty taitekerroin taajuuden funktiona ($\theta = 0^\circ$), a) kun vain elektronien liike on otettu huomioon ja b) kun sekä elektronien että ionien liikkeet on otettu huomioon. Kuvassa näkyviä taajuuksia $f_1 \dots f_4$ ei ole esitelty tarkemmin, koska ne ovat $\gg f_{He}$ eivätkä näin liity vihellysmoodiin.



Kuva 4.2 n^2 taajuuden funktiona ($\theta = 0^\circ$), a) kun vain elektronien liike on otettu huomioon ja b) kun sekä elektronien että ionien liikkeet on otettu huomioon. Taajuudet $f_1 \dots f_4 \gg f_{He}$, joten niitä ei ole tarkasteltu lähemmin. (PARK, 1982)

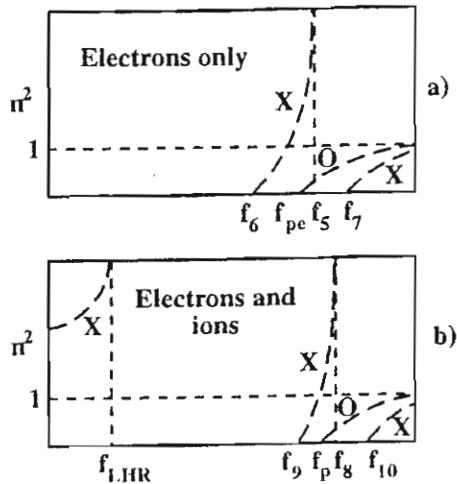
Ionien vaikutus on selvästi havaittavissa matalilla taajuuksilla. Tällöin taitekerroin saa äärellisen arvon, kun $f \rightarrow 0$ ja lisäksi taajuuksille $f < f_{Hi}$ ilmestyy uusi etenemismoodi, jota kutsutaan Alfvén-moodiksi.

Toinen erikoistapaus liittyy poikittaiseen etenemiseen. Tällöin taitekertoimeksi saadaan

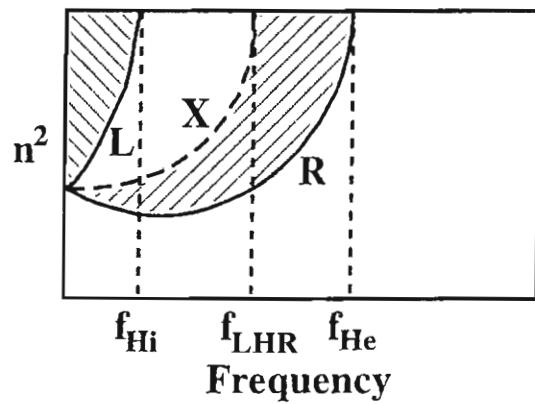
$$\begin{cases} n^2 = 1 - X & \text{(ordinariaalto)} \\ n^2 = \frac{[X - (1 + Y_e)(1 - Y_i)][X - (1 - Y_i)(1 + Y_e)]}{(1 - Y_e^2)(1 - Y_i^2) + X(Y_e Y_i - 1)} & \text{(ekstraordinariaalto)} \end{cases} \quad (4.11)$$

Kuvassa 4.3 on esitetty taitekerroin taajuuden funktiona ($\theta = 90^\circ$), a) kun vain elektronien liike on otettu huomioon ja b) kun sekä elektronien että ionien liikkeet on otettu huomioon. Kuvassa näkyviä taajuuksia $f_5 \dots f_7$ ja $f_8 \dots f_{10}$ ei ole esitelty tarkemmin, koska ne ovat $\gg f_{He}$ eivätkä näin liity vihellysmoodiin. Taajuus $f_{LHR} < f_{He}$ ja on siten merkittävä tarkasteltaessa vihellysmoodia.

Ionien huomioon ottaminen on merkittävää, sillä niiden vaikutus mahdollistaa myös poikittaisen etenemisen vihellysmoodin aallolle, jonka taajuus on alle f_{LHR} . Kuvassa



Kuva 4.3 n^2 taajuuden funktioita ($\theta = 90^\circ$), a) kun vain elektronien liike on otettu huomioon ja b) kun sekä elektronien että ionien liikkeet on otettu huomioon. Taajuudet $f_5 \dots f_7$ ja $f_8 \dots f_{10} \gg f_{He}$, joten niitä ei ole tarkasteltu lähemmin. (PARK, 1982)



Kuva 4.4 n^2 taajuuden funktio, kun ionien liikkeet on otettu huomioon sekä pitkittäiselle että poikittaiselle etenemiselle. (PARK, 1982)

4.4 on yhdistetty ionien vaikutus sekä pitkittäiseen että poikittaiseen etenemiseen. Viivoitetulla alueella etenemissuunta voi olla $0 < \theta < 90^\circ$.

Mikäli ionien vaikutus jätetään huomiotta, taitekerroin tulee äärettömän suureksi resonanssikulmalla θ_R . Tällöin eteneminen suuntaan $\theta > \theta_R$ ei ole sallittua. Jos ionien vaikutus otetaan huomioon, eteneminen kaikkiin suuntiin on mahdollista taajuuksilla $f < f_{LHR}$. Mikäli aallon taajuus on suurempi kuin LHR, edes ionien vaikutuksen ottaminen huomioon ei salli poikittaista etenemistä.

Koska ehto $f_p \gg f_{He} \gg f_{Hi}$ on yleensä voimassa sekä iono- että magnetosfääriässä,

voidaan f_{LHR} :lle esittää likimääräinen yhtälö

$$\frac{1}{f_{LHR}^2} = \frac{1}{f_{He} f_{Hi}} + \frac{f_{He}}{f_{Hi} f_p^2}, \quad (4.12)$$

eli

$$\frac{m_e}{m_i} \frac{1}{f_{LHR}^2} = \frac{1}{f_p^2} + \frac{1}{f_{He}^2}. \quad (4.12')$$

Jos ionia on useita eri lajeja, taitekertoimen diagrammiin (kuva 4.4) ilmestyy lisää heijastuspisteitä ja singulariteetteja. Tällöin yhtälössä (4.12') m_i pitää korvata efektiivisellä massalla, jossa on otettu huomioon eri ionilajien suhteelliset osuudet. Lisäksi toiset ionit aiheuttavat taitekerroinkäyrien ristikkään menon leikkaustaajuudella f_{c-o} . Jos eri moodilla on sama taitekerroin ja polarisaatio, moodit saattavat kytkeytyä, jolloin energianvaihto aallolta toiselle on mahdollista. Tässä yhteydessä vinosti etenevien aaltojen merkitys korostuu.

4.2.2 Kvasi-longitudinaalinen (QL) approksimaatio

Appleton–Hartteen yhtälö ja polarisaatioyhtälö ovat vaikeita käyttää, koska ne ovat kompleksisia. Jos aallon etenemissuunnan ja magneettikenttäviivan välinen kulma θ ei ole kovin suuri, voidaan yhtälöitää huomattavasti yksinkertaistaa jättämällä Y_T :tä sisältävät termit huomiotta, ts. jos

$$Y_T^4 \ll 4Y_L^2(1-X)^2, \quad (4.13)$$

voidaan yhtälö (4.3) kirjoittaa muotoon

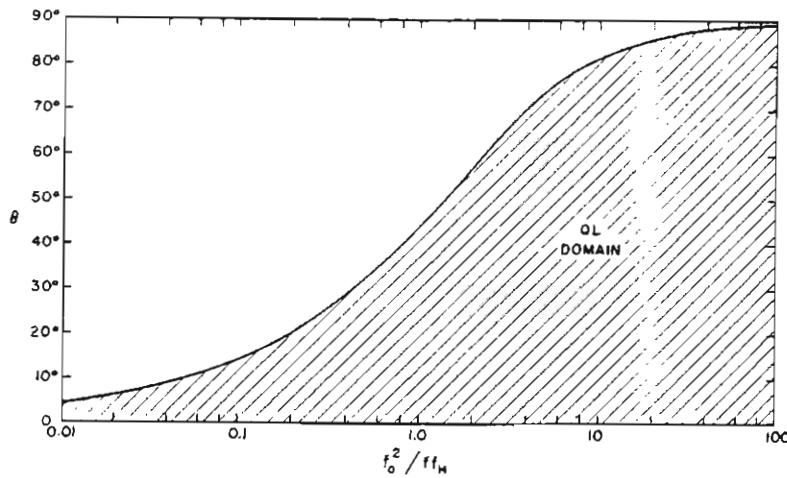
$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - |Y_L|}. \quad (4.14)$$

Yhtälöön on valittu suoraan $--$ -merkki vihellysmoodin vuoksi. Yhtälö (4.14) voidaan esittää myös muodossa

$$n^2 = 1 + \frac{f_p^2}{ff_H \cos \theta - f^2} \approx \frac{f_p^2}{ff_H \cos \theta - f^2}. \quad (4.14')$$

Aaltopaketin ryhmänopeus voidaan esittää ryhmätaitekertoimen ($n_g = c/v_g$) avulla, missä n_g riippuu n :stä seuraavasti

$$n_g = \frac{d}{df}(nf). \quad (4.15)$$



Kuva 4.5 Viivoitetussa alueessa voidaan käyttää QL-approksimaatiota. (HELLIWELL, 1965).

Sijoittamalla tulos (4.14') yhtälöön (4.15) saadaan ryhmätaitekertoimen lausekkeeksi

$$n_g = \frac{1}{2} \frac{f_p f_H \cos \theta}{f^{1/2} (f_H \cos \theta - f)^{3/2}}. \quad (4.16)$$

Olosuhteet, missä QL-approksimaatio on voimassa, riippuvat niin väliaineen parametreista kuin θ :sta. Kvantitatiivisemmassa tarkastelussa voidaan QL-approksimaatio tehdä, kun yhtälön (4.13) oikea puoli on yli yhdeksän kertainen vasempaan verrattuna. Kun $X \gg 1$, ionosfäärissä ja magnetosfäärissä voidaan $(1-X)^2$ korvata X^2 :lla, jolloin saadaan

$$\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} < \frac{2}{3} \frac{f_p^2}{f f_H}. \quad (4.17)$$

HELLIWELL (1965) on esittänyt θ :n f_p^2/ff_H :n funktiona kuvan 4.5 mukaisesti.

Kun $f_p^2/ff_H \gg 1$ (esimerkiksi plasmapausin ulkopuolella etenevien emissioiden yhteydessä), QL-approksimaatio pätee myös hyvin suurilla θ :n arvoilla.

4.3 Aalto-hiukkasvuorovaikutus

4.3.1 Yleistä

Aallon edetessä plasmassa se väistämättä joutuu tekemisiin erilaisten hiukkasten kanssa. Tällöin aalto-hiukkasvuorovaikutuksessa voi tapahtua energian vaihtoa hiukkaselta aallolle tai päinvastoin. Ensimmäisessä tapauksessa aalto vahvistuu ja energiaansa menetetään hiukkaset voivat presipitoitua ionosfäärin. Päinvastaisessa tapauksessa aallot vaimenevat.

Energeettiset hiukkaset muodostavat vain hyvin pienen osan kokonaishiukkastiheydestä magnetosfäärisä. Siksi kylmän plasman approksimaatio voidaan hyväksyä. Aaltojen ja hiukkasten resonanssitilanne syntyy, kun energettisten hiukkasten nopeus on samaa luokkaa kuin aallon vaihenopeus. Saavuttaakseen elektronien kanssa saman nopeuden protoneilla on oltava noin 1840-kertainen energia elektroneihin nähdyn.

Yleisesti vuorovaikutusta vihellysmoodin aallon ja elektronisuihkun välillä pidetään paljon merkittävämpänä kuin vihellysmoodin aallon ja protonisuihkun välillä. Tämä ilmenee suoraan aihetta käsittelevien julkaisujen määristä, sillä 1970-luvun alun jälkeen vasta viime vuosina on jatkettu tutkimuksia VLF-aaltojen ja protonien vuorovaikutuksesta joissakin erikoistapauksissa. Tällöinkin jo 1960-luvulla kehitetyjen teorioiden tarkastelu tunnutaan unohdetun kokonaan puhumattakaan kokeellisista testeistä. Kuitenkin esimerkiksi Porojärvellä rekisteröityjä vihellyksen liipaisemia kuoroja on hyvin vaikea selittää täysin elektronisyklotronimekanismilla. Luonnollisesti myös protonisyklotronimekanismi joutuu vaikeuksiin, mikäli sen pitäisi selittää kaikki yksityiskohdatkin. Todennäköisesti teoreettisessa tarkastelussa pitäisi ottaa huomioon molemmat mekanismit ja näiden yhteisvaikuttus.

Aalto-hiukkasvuorovaikutuksessa tapahtuva energianvaihtoa voidaan kuvata tutulla yhtälöllä

$$\begin{aligned}
 \Delta W &= \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{s} \\
 &= q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \Delta \mathbf{s} \\
 &= q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} \Delta t \\
 &= q\mathbf{E} \cdot \mathbf{v} \Delta t + (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} \Delta t \\
 &= q\mathbf{E} \cdot \mathbf{v} \Delta t,
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

missä \mathbf{F} on sähkö- ja magneettikentien aiheuttama hiukkaseen vaikuttava voima, $\Delta \mathbf{s}$ on hiukkasen kulkema matka nopeudella \mathbf{v} ajassa Δt ja q on hiukkasen varaus.

Varattujen hiukkasten liikettä magnetosfäärisä kontrolloi ensisijaisesti maan magneettikenttä. Tämän vuoksi hiukkasen nopeusvektori voidaan jakaa kentän suuntaiseen (pitkittäiseen) ja kenttää vastaan kohtisuoraan (poikittaiseen) komponenttiin. Poikittainen komponentti pyörii kenttäviivan ympäri hiukkasen gyrotaajuudella.

Näin saadaan kaksi eri resonanssityyppiä, joista ensimmäinen liittyy pitkittäiseen nopeuskomponenttiin (siitä käytetään myös nimityksiä Landau- tai Cerenkov-resonanssi). Toinen resonanssityyppi liittyy poikittaiseen nopeuskomponenttiin (siitä käytetään myös nimystä syklotroniresonanssi). Nämä voidaan esittää muodossa

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\parallel} \cdot \mathbf{v}_{\parallel} = \text{vakio} & \text{(Cerenkov)} \\ \mathbf{E}_{\perp} \cdot \mathbf{v}_{\perp} = \text{vakio} & \text{(syklotroni)} \end{cases} \tag{4.19}$$

4.3.2 Pitkittäinen resonanssi

Jos v_{\parallel} yhtyy aallon vaihenopeuteen edellyttää, että myös aallon sähkökentällä on pitkittäinen komponentti, hiukkanen voi havaita aallon taajuuden Doppler-siirtyneenä nollataajuudelle. Tällöin aallon vaihenopeus

$$v_{ph} = v_{\parallel} \cos \theta, \quad (4.20)$$

josta edelleen sijoittamalla $v_{ph} = c/n = 2\pi f/k$ saadaan

$$f - \frac{1}{2\pi} k_{\parallel} v_{\parallel} = 0. \quad (4.21)$$

Tämä yhtälö täyttää Cerenkov-ehdon, eli tilanteen, jossa hiukkasen nopeus on suurempi kuin aallon vaihenopeus magnetosfäärin plasmassa. Cerenkov-olosuhteet ovat olemassa esimerkiksi revontulien yhteydessä. Yleensä Cerenkov-säteily liitetään energeettisiin elektroneihin, mutta myös protonit saattavat tulla kyseeseen.

Cerenkov-säteily sellaisenaan ei riitä selittämään maanpinnalla havaittuja aaltojen intensiteettejä (LIEMOHN, 1965). Mikäli aallon ryhmännopeus on sama kuin aallon vaihenopeus, saavutetaan ns. koherenssiehto. Tällöin myös intensiteetit ovat yhtäpitäviä havaintojen kanssa.

4.3.3 Poikittainen resonanssi

Jos gyroliikkeessä olevan elektronin gyrokulmataajuus yhtyy aallon sähkökenttävektorin poikittaisen komponentin kulmataajuuteen, hiukkanen voi havaita aallon taajuuden ylöspäin Doppler-siirtyneenä gyrotaajauudelle. Toisaalta hiukkasen gyrotaajuus voi Doppler-siirtyä alas päin aallon taajuudelle. Tämä ehto toteutuu, kun vihellysmoodin aalto ja elektronit etenevät vastakkaisiin suuntiin. Luonnollisesti myös polarisaatioiden pitää olla sama. Doppler-siirtymän toteuttava yhtälö poikittaiselle resonanssille on

$$v_{ph} \frac{f_{He} - f}{f} = -\gamma v_{\parallel} \cos \theta, \quad (4.22)$$

missä $\gamma = (1 - v_{\parallel}^2/c^2)^{-1/2}$. Epärelativistisille elektroneille $\gamma \sim 1$.

MACARTHUR (1959) esitti ensimmäisenä, että VLF-kuoro on syntynyt protonien syklotronisäteilystä. Jotta poikittainen vuorovaikutus vihellysmoodin aallon ja protonien välillä olisi mahdollista, protonin pitää ”nähdä” aallon polarisaatio vasenkätsisenä. Kun havaittajan nopeus kasvaa havaitun aallon taajuus pienenee, kunnes havaittajan nopeus yhtyy aallon vaihenopeuteen ja näin aallon taajuus menee nollaksi. Jos havaittajan nopeus kasvaa edelleen, aallon havaittu taajuus alkaa kasvaa, mutta sen polarisaatio vaihtuu vastakkaiseksi verrattuna alkuperäiseen. Tällöin Doppler-siirtymää kutsutaan anomaaliseksi. Anomaalisen Doppler-siirtymän toteuttava yhtälö poikittaiselle resonanssille on

$$v_{ph} \frac{f_{Hi} + f}{f} = \gamma v_{\parallel} \cos \theta. \quad (4.23)$$

Emission taajuuden muutos ajan funktiona voidaan laskea teoreettisesti (esim. MURCRAY and POPE 1960; GINZBURG 1961).

Yhtälöt (4.22) ja (4.23) voidaan yhdistää kirjoittamalla

$$v_{ph} \frac{f \pm f_{Hi,e}}{f} = \gamma v_{\parallel} \cos \theta, \quad (4.24)$$

jossa ylempi merkki liittyy protoniin ja alempi elektroniin. Tämä voidaan edelleen kirjoittaa, kuten pitkittäisessä resonanssissakin

$$f - \frac{1}{2\pi} \gamma k v_{\parallel} = \mp b f_{Hi,e}, \quad (4.25)$$

missä $b = 1$ (kun k on kentänsuuntainen). Mikäli k ei ole kentän suuntainen, myös korkeamman kertaluvun resonanssit ovat mahdollisia, jolloin yhtälössä (4.25) oikealla puolella oleva kerroin $b = 2, 3, 4, \dots$

4.3.4 Anisotropia

Vihellysmoodin aaltojen ja hiukkasten vuorovaikutus edellyttää hiukkasten anisotroopisen pitch-kulmajakauman olevan epästabiliili. Tällöin hiukkaset voivat synnyttää aaltoja, jotka edelleen vaikuttavat hiukkasten pitch-kulmaan. Tämä puolestaan aiheuttaa pitch-kulmajakauman uudelleenjärjestymistä isotrooppiseen suuntaan. Pitch-kulmajakauman uudelleenjärjestymisen fysikaalinen merkitys liittyy hiukkasten presipitoitumiseen, kun ne joutuvat ns. häviökartioon. Jossakin mielessä pitch-kulmajakauma on aina anisotroopinen, kunnes häviökartio on tyhjä. Toisaalta aalto-hiukkasvuorovaikutus tuo koko ajan uusia hiukkasia häviökartioon ja näin prosessi jatkuu.

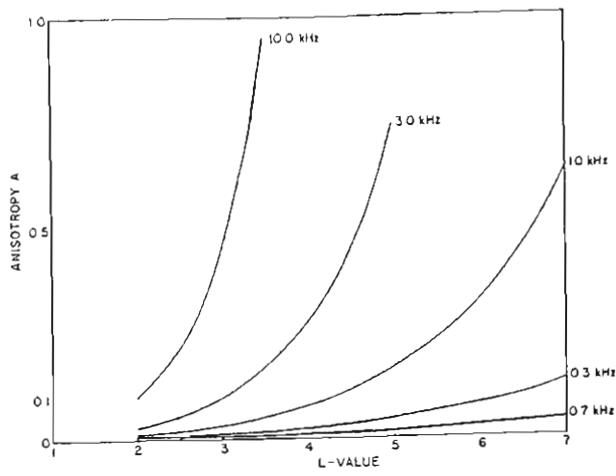
Kun tarkastellaan plasmaa, jossa $T_{\perp} > T_{\parallel}$ (bi-Maxwellian), voidaan määritellä uusi parametri, joka kuvaaa anisotropiaa

$$A = \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} - 1. \quad (4.26)$$

KENNEL and PETSCHEK (1966) ovat osoittaneet, että syklotroniepästabiliisuutta esiintyy, kun anisotropia ylittää kriittisen arvon A_c , joka esitetään muodossa

$$A_c = \frac{f}{f_H - f}. \quad (4.27)$$

Kuvassa 4.6 on esitetty kriittinen anisotropia eri taajuisille aalloille L -arvon funktiona. Kaikilla taajuksilla on tyypillistä, että kriittinen anisotropia kasvaa voimakkaasti L -arvon kasvaessa. Näin L :n kasvaessa syntyvien aaltojen taajuus laskee. Matalaenergisten hiukkasten jakauma ei tällöin voi tulla epästabiliiksi tällä mekanismilla.



Kuva 4.6 Kriittinen anisotropia L -arvon funktiona viidelle eri aallon taajuukselle. (RYCROFT, 1972).

4.3.5 Diffuusio

Kun syklotronimekanismissa syntyy aaltoja ja samalla hiukkasten pitch-kulmajakauma muuttuu, voidaan puhua diffuusiosta. Voidaan osoittaa (HARGREAVES, 1979), että diffuusokerroin on

$$D_\alpha \sim \omega_H^2 \left(\frac{\delta B}{B} \right)^2 \Delta t, \quad (4.28)$$

missä δB on aallon magneettivuon tiheys, B on magneettivuon tiheys resonanssialueella ja Δt on hiukkasten ja aallon vuorovaikutusaika.

Diffuusiota kokevat hiukkaset ovat koko ajan myös peililiikkeessä pallonpuoliskojen välillä. Lähellä peilautumispistettä osa hiukkasia presipitoituu ionosfäärin ja näin pitch-kulmajakauma järjestyy uudelleen ekvaattorialueella. Jos diffuusio on hidasta, eli ennen joutumistaan häviökartioon hiukkanen ehtii poukkoilla useita kertoja peililiikkeessään, puhutaan heikosta diffuusiosta. Tällöin diffuusokerroin riippuu lähinnä aallon intensiteetistä. Pitch-kulmajakauma ei riipu hiukkaslähteestä eikä diffuusiodertoimen arvosta.

Voimakkaasta diffuusiosta puhutaan silloin, kun hiukkaset joutuvat häviökartioon lyhyemmässä ajassa kuin niiden peilautumisaika pallonpuoliskolta toiselle. Tällöin pitch-kulmajakauma on lähes isotrooppinen ekvaattorialueella, koska häviökartioon joutuneiden hiukkasten jättämä ”aukko” täyttyy hyvin nopeasti. Häviö riippuu nyt häviökartion koosta ja peililiikkeen jaksonajasta, mutta ei diffuusiodertoimen arvosta.

Syklotroniresonanssi on yksi hiukkasvuota rajoittava prosessi magnetosfärissä. Hiukkasvuon lisääntymisen kasvattaa aallon intensiteetti ja tämä edelleen diffuusiodertointa. Magneettisen häiriön johdosta aaltonhiukkasvuorovaikutukseen osallistuvien hiukkasten

määrä ja pitch-kulma-anisotropia kasvaa ekvaattorialueella, mistä seuraa aaltojen voimistuminen. Hiukkasten määrä ei kasva rajattomasti, vaan energia siirryy aalloille ja hiukkaset joutuvat häviökartioon.

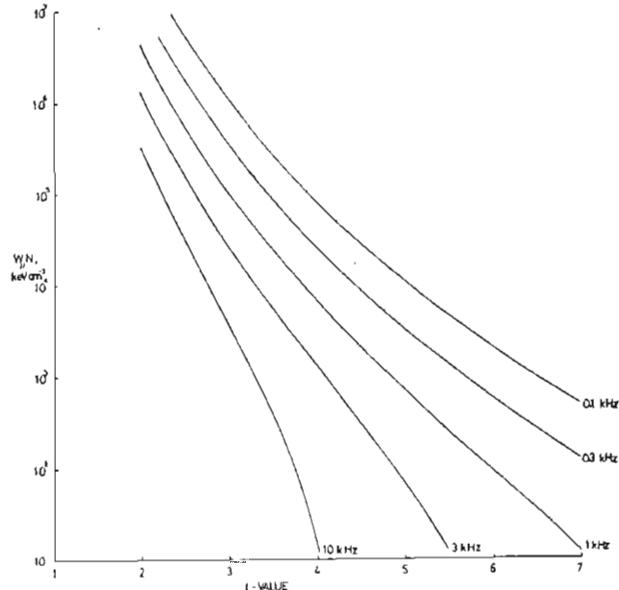
4.3.6 Hiukkasen energiarajat syklotronimekanismissa

Hiukkasen kineettinen energia on tunnetusti $W = mv^2/2$. Ratkaisemalla yhtälöstä (4.25) elektronin nopeus tilanteessa, jossa aalto etenee kentän suuntaisesti ja korottamalla se nelioön, sijoittamalla $k^2 = n^2\omega^2/c^2 = 4\pi^2n^2f^2/c^2$, käyttämällä yhtälöä (4.14') ja sijoittamalla edelleen $mc^2/2 = 256$ keV voidaan resonoivan elektronin kineettinen energia (keV:ina) tietyllä aallon taajuudella laskea lausekkeesta

$$W_{||} = 256 \frac{(f_{He} - f)^3}{ff_p^2} \text{ keV}, \quad (4.29)$$

joka voidaan edelleen esittää elektronitiheyden funktiona (yksiköt $N[m^{-3}]$ sekä $f, f_{He}[\text{Hz}]$)

$$W_{||} \simeq \frac{3,16}{N} \frac{(f_{He} - f)^3}{f} \text{ keV}. \quad (4.29')$$



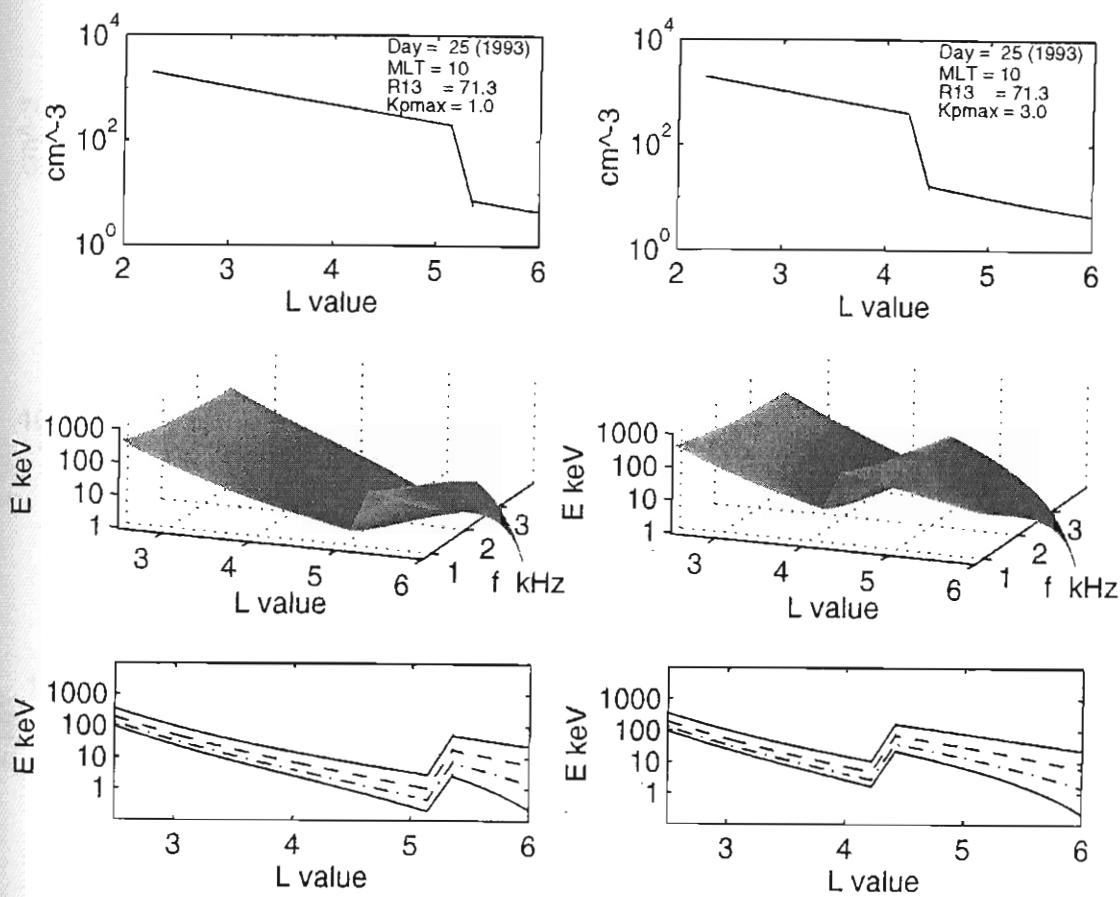
Kuva 4.7 Elektronin kentän suuntaisen energiakomponentin ja elektronitiheyden tulo ($W_{||}N$) L -arvon funktiona viidelle aallon taajuudelle.
(RYCROFT, 1972).

Kuvassa 4.7 on esitetty elektronin kentän suuntaisen energiakomponentin ja elektronitiheyden tulo ($W_{||}N$) L -arvon funktiona viidelle aallon taajuudelle.

Kriittisen anisotropian A_c (yhtälö 4.27) avulla (lisäksi sijoittamalla f_p :n ja f_H :n lausekeet) yhtälöstä (4.31) saadaan resonoiville hiukkasille energiaraja kentän suunnassa

$$W_{\parallel} = \frac{B^2}{2\mu_0 N} \frac{1}{A_c(A_c + 1)^2}. \quad (4.30)$$

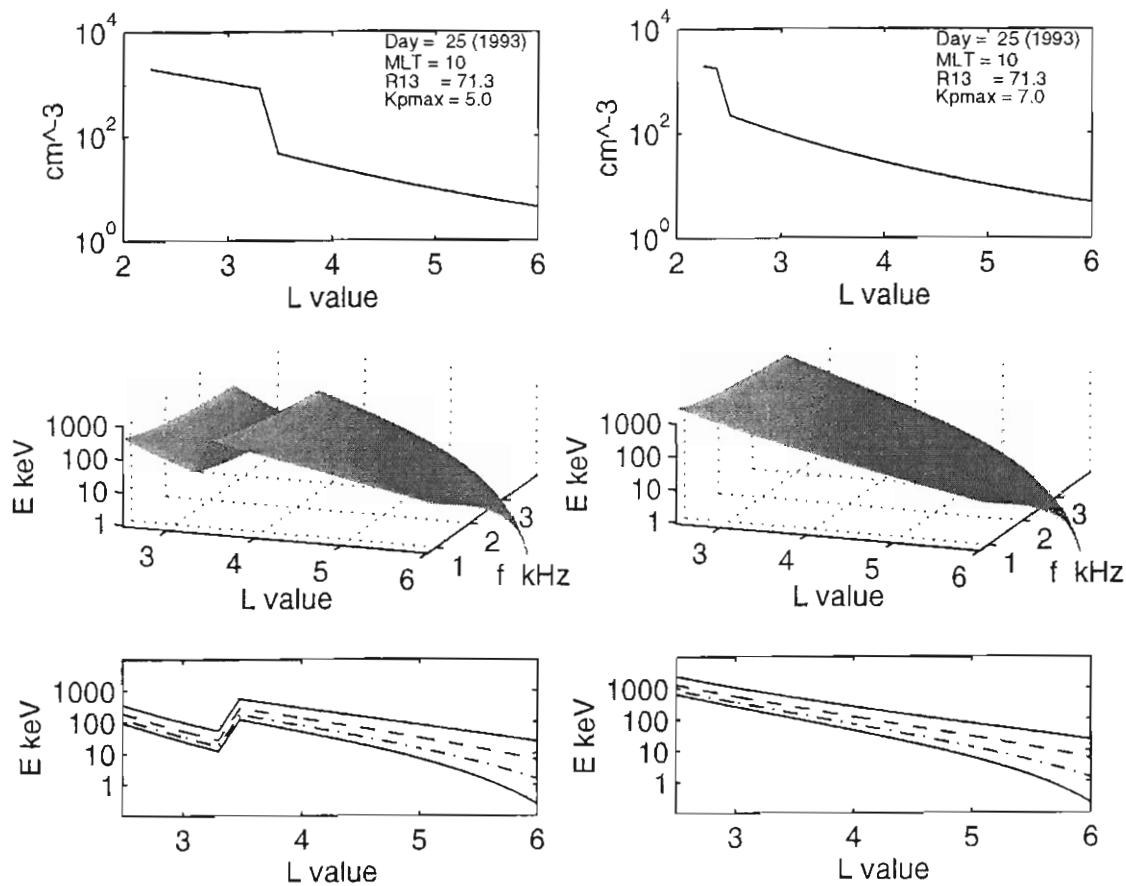
Hiukkasilta on erilainen anisotropia riippuen poikittaisen ja pitkittäisen energiakomponenttien suhteesta. Tällöin hiukkasten anisotropiat muodostavat tietynlaisen jakauman ja vain sellaiset hiukkaset, joiden kriittinen anisotropia on pienempi kuin jakauman anisotropia ($A > A_c$), voivat vahvistaa aaltoa. Siten yhtälöstä (4.30) saadaan syklotroniresonanssissa presipitoituvien hiukkasten minimienergia. Yhtälössä (4.30) B ja A_c riippuvat peri-



Kuva 4.8a,b Syklotroniresonanssissa presipitoituvien hiukkasten minimienergiat L -arvoilla 2,5–6,0 ja aallon taajuuksilla 0,75–4,0 kHz ekvaattorialueella. Energia-arvot ovat elektroni-VLF-aaltovuorovaikutukselle. Ylinnä ekvatoriaalinen elektronitiheysprofili ja alinna minimienergiat taajuuksille 1, 2, 3 ja 4 kHz (järjestyksessä ylhäältä alas). a) $K_p = 1,0$ ja b) $K_p = 3,0$.

aatteessa vain L -arvosta, mutta N riippuu myös magneettisesta aktiivisuudesta, jota kuvataan K_p :llä. Tarvittavan ekvatoriaalisen elektronitiheysprofiilin laskemiseksi on käytetty CARPENTER and ANDERSONIN (1992) kehittämää mallia, joka tarvitsee lähtöparametreiksi edeltävän 24 tunnin K_{pmax} , päivänumeron, MLT:n ja 13 kuukauden tasoitetun auringonpilkkuluvun.

Kuvissa 4.8a-d on esitetty esimerkkipäivänä (25.01.1993) syklotroniresonanssissa presipitointuvien hiukkasten minimienergiat L -arvoilla 2,5–6,0 ja aallon taajuuksilla 0,75–4,0 kHz ekvaattorialueella eri K_p :n arvoille. Kyseiset energia-arvot pätevät myös protoni-ioni-syklotroniaaltovuorovaikutukselle (HARGRAVES, 1979).

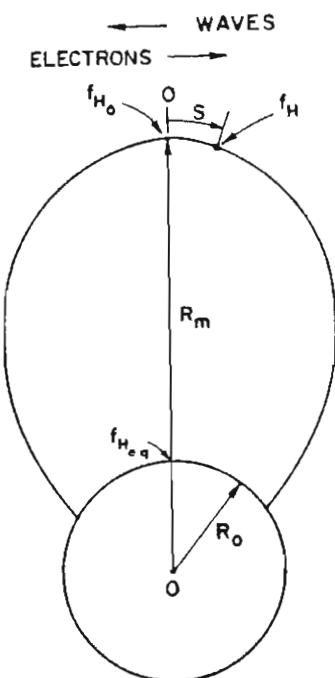


Kuva 4.8c,d Sama kuin kuva 4.8a,b, mutta nyt c) $K_p = 5,0$ ja d) $K_p = 7,0$.

Kuten kuvista 4.8a-d voidaan havaita, magneettinen aktiivisuus vaikuttaa merkittävästi aaltohiukkasvuorovaikutukseen osallistuvien hiukkasten minimienergiaan.

4.3.7 Diskreettien emissioiden piirteitä

Vaikka HELLIWELLIN (1967) esittämällä teorialla diskreettien emissioiden synnystä onkin ikää jo liki kolmekymmentä vuotta, se on edelleen täysin hyväksytty ja käytössä. Tämän vuoksi on syytä tarkastella hieman kyseistä teoriaa. Se perustuu elektronien syklotronisäteilyyn, joka vahvistuu aalto-hiukkasvuorovaikutuksessa. Mallissa oletetaan, että vuorovaikutus tapahtuu lähellä ekvaattoritasoa, mutta vuorovaikutusalueen liikkuminen pitkin kentäviivaa sallitaan. Kuvassa 4.9 on esitetty muutamia tarpeellisia parametreja.



Kuva 4.9 Yksinkertaistettu kuva vuorovaikutusalueen sijainnista kentäviivan ja ekvaattoritason suhteeseen. S on etäisyys ekvaattoritasosta, f_{H_0} , f_H ja f_{Heq} ovat elektronin gyrotaajuudet eri paikoissa, R_m kentäviivan pisin etäisyys maan keskipisteestä. (HELLIWELL, 1967)

Käyttämällä hyväksi poikittaisen resonanssin yhtälöä (4.22) saadaan aallon taajuudeksi

$$f = f_{He} \frac{v_{ph}}{v_{ph} + v_{\parallel}}. \quad (4.31)$$

Lähellä ekvaattoritason elektronitiheyden oletetaan olevan riippumaton leveysasteesta. Staattinen magneettikenttä voidaan olettaa dipoliksi ja sen voimakkuus riippuvaksi etäisyydestä pitkin kentäviivaa. Kun asetetaan $f_H = f_{H_0}$, saadaan emission taajuuden muutosnopeuden (df/dt) riippuvuus S:stä

$$\frac{df}{dt} = K_1 S \lambda^{3/2} \frac{(1-\lambda)^{3/2}}{(1+2\lambda)^2} \left[1 + \frac{(1-\lambda)}{3} \tan^2 \alpha \right], \quad (4.32)$$

missä

$$K_1 = \frac{54c f_{H0}^2}{R_m^2 f_p} , \quad \lambda = f/f_{He} \quad \text{ja} \quad \alpha = \text{elektronin pitchkulma.}$$

Tarkasteltaessa df/dt :n käyttäytymistä voidaan tilannetta yksinkertaistaa asettamalla $\alpha = 0^\circ$, kun hakasulkeissa oleva korjaustermi $<0,1$ pitch-kulmalle 30° . Silloin termi $(1/K_1 S)(df/dt) = \lambda^{3/2}([1 - \lambda]^{3/2}/[1 + 2\lambda]^2)$ kuvaaa tietyssä paikassa syntyneen emission taajuuden muutoksen kulmakerrointa.

Kasaantuminen (bunching) ja säteily tapahtuvat koko vuorovaikutusalueella, mutta kuitenkin kasaantuminen dominoi ensimmäisellä puoliskolla ja säteily toisella. Näin voidaan olettaa, että kasaantuminen rajoittuu vain ensimmäiseen puoliskoon ja aallon amplitudi on tällä alueella vakio. Kasaantumisen aikana oletetaan vaihe-eron poikittaisen nopeuden ja aallon magneettikentän välillä olevan $+\pi - -\pi$, mikä tarkoittaa, että elektri on aallon potentiaalikuopassa. Tämä potentiaalikuoppa on resonanssialue, ja sen pituus on puolet vuorovaikutusalueen pituudesta.

Resonanssipituus saadaan lausekkeesta

$$L = 2 \left[\frac{R_E^2}{4,5 f_{H0}} \left(\frac{f_{Heq}}{f_{H0}} \right)^{2/3} \frac{c}{f_p} \frac{(f_{H0} - f)^{3/2}}{f^{1/2}} \right]^{1/3} = 5,85 \cdot 10^5 \frac{(1 - \lambda)^{1/2}}{f_p^{1/3} f_{H0}^{2/9} \lambda^{1/6}} \text{ km}, \quad (4.33)$$

missä $f_{H0} = f_{Heq}(R_E/R_m)^3$.

Resonanssipituus riippuu pääasiassa f/f_H -sta ($=\lambda$) ja se saa arvoja 1000–2000 km. Resonanssialueen pituus on tavallisesti useita aallonpituuksia.

Resonanssipituuteen liittyy hyvin läheisesti myös säteilyn kaistanleveys. Elektronin gyrotaajuuden vaihtelu resonanssialueen sisällä on yksi taajuuden leviämisen syy. Tätä kutsutaankin gyrotaajuuslevenemäksi (gyrofrequency broadening). Gyrotaajuuslevenemä on suurin arvo, jonka gyrotaajuus ja Doppler-siirrynyt aallon taajuus voivat poiketa toisiaan. Se saadaan yhtälöstä

$$(\Delta f)_H = 1,7 \cdot f_{H0} \left(\frac{L}{R_m} \right)^2. \quad (4.34)$$

Doppler-levenemästä johtuva kaistan kokonaisleveys resonanssipituudella L_Δ on

$$(\Delta f)_D = v_{||}/L_\Delta. \quad (4.35)$$

Jos oletetaan, että $L_\Delta = L$, niin kaistanleveys $(\Delta f)_D$ on sopusoinnussa juuri keskinäisen resonanssiajan ($L/v_{||}$) kanssa. $(\Delta f)_D$:n tyypillinen arvo on 40 Hz ($= 4 \cdot 10^4$ km/s /1000 km), joka vastaa resonanssiaikaa 25 ms. Jos elektronin resonanssipituus on pienempi

kuin L , voidaan niiden vaikutus jättää huomiotta. Siksi Doppler-levenemisestä johtuva kaistanleveyttä voidaan approksimoida v_{\parallel}/L :llä. Silloin valitsemalla $f_H = f_{H0}$ ja käyttämällä yhtälöitä (4.33) ja (4.35) sekä resonoivien elektronien kentänsuuntaisen nopeuden lauseketta

$$v_{\parallel} = \frac{c}{f_p} \frac{(f_H - f)^{3/2}}{f^{1/2}}. \quad (4.36)$$

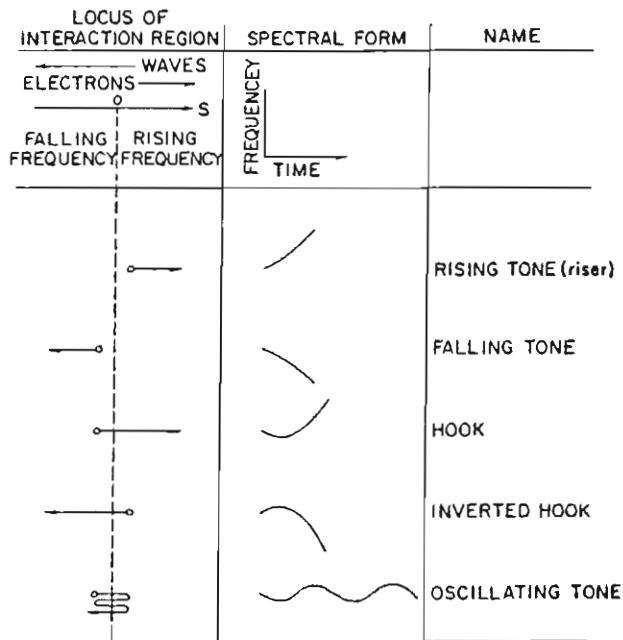
saadaan

$$(\Delta f)_D = \frac{0,51 f_{H0}^{14/9}}{f_p^{2/3}} \frac{(1 - \lambda)}{f^{1/3}}. \quad (4.37)$$

Kokonaiskaistanleveydeksi tässä mallissa saadaan (4.34):n ja (4.37):n summa.

Kun sovelletaan energian säilymislakia vuorovaikutusalueeseen, pitää alueen liikkua sellaisella nopeudella, että aallon ulostuoma energia on yhtä suuri kuin resonoivien elektrolien luovuttama kineettinen energia (DOWDEN, 1971). Vuorovaikutusalueen liikkuminen tapahtuu tällöin nopeudella, joka on aallon ryhmänopeuden ja v_{\parallel} välissä.

Vuorovaikutusalueen liikkeet aiheuttavat emission taajuusmuutokset kuvan 4.10 mukaisesti.



Kuva 4.10 Vuorovaikutusalueen liikkeen aiheuttamat emission taajuusmuutokset. (HELLIWELL, 1967)

4.3.8 Protonisuihku ja vihellysmoodi

Vihellysmoodin aallon ja elektronien vuorovaikutusta voidaan tutkia suoraviivaisesti edellä esitettyjen yhtälöiden avulla, kun tarkastellaan aaltoa vastaan etenevää elektronisuihkuja. Toisaalta se on myös yleisin VLF-emissioiden syntyyyn liitetty vuorovaikutus, joten aihetta on tutkittu paljon. Puolestaan aallon kanssa samaan suuntaan etenevän protonisuihkon vuorovaikutus on syystä tai toisesta jäänyt unohduksiin ja siitä syystä sitä tarkastellaan tässä hieman. Sitä esitti ensimmäisenä GINZBURG (1961). Tämän jälkeen KIMURA (1961) on tehnyt perusteellisempia laskelmia vuorovaikutuksesta. Hän lähti liikkeelle Maxwellin yhtälöistä ja protonisuihkon likeyhtälöstä ympäröivässä plasmassa ja johti dispersioyerhälön magneettikentän suuntaan etenevälle aalloille.

Amplitudin vahvistuminen (Γ) 1000 km:n resonanssipituudelle on

$$\Gamma = 63,15 \cdot 10^{-5} \sqrt{N_p f_{He}/f} \text{ (dB/1000km)}, \quad (4.38)$$

missä N_p on protonien numerotiheys. Jos oletetaan, että $f_{He}/f = 2$ ja $N_p = 5 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$ (arvot ovat likimain todellisia 15.01.1993 vihellyksen liipaisemien kuorojen tapauksissa), VLF-aallon vahvistumiselle saadaan arvo 20 dB/1000 km. Tämä arvo ei riitä yksin nostamaan epäkoherentin säteilyn intensiteettiä teoreettiselta tasolta havaitulle tasolle, mutta on kuitenkin varteenotettava mekanismi VLF-aallon vahvistumiseksi aalto-protonisuihku-vuorovaikutuksessa. Koska mekanismi toimii hyvin kapealla taajuusalueella kerrallaan, mikä tahansa voimakas kohina, vihellys, suhina tai salama voi vahvistaa ja synnyttää diskreettejä VLF-emissioita (KIMURA, 1967).

NEUFELD and WRIGHT (1964) ovat osoittaneet teoreettisesti, että vihellysaallon ja ionisuihkon vuorovaikutuksessa voi emittoitua taajuuksia, jotka sopivat tiettyjen rajataajuuksien väliin. Näin voidaan määritellä kolme erillistä taajuusaluetta $\tilde{\omega}_I$, $\tilde{\omega}_{II}$ ja $\tilde{\omega}_{III}$, jotka rajoittuvat seuraavasti:

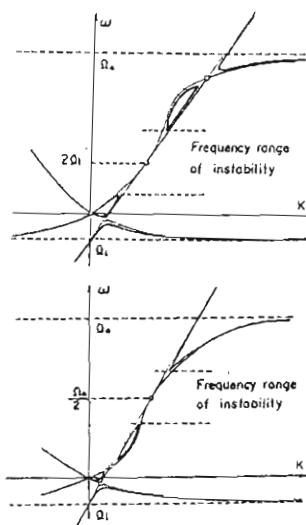
$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\omega}'_a > \tilde{\omega}_I > \frac{1}{2}\omega_{He} \\ \frac{1}{2}\omega_{He} > \tilde{\omega}_{II} > \tilde{\omega}_a \\ \tilde{\omega}_a > \tilde{\omega}_{III} > \tilde{\omega}_b. \end{array} \right. \quad (4.39)$$

Näistä vain kaksi ylintä ovat VLF-taajuusalueella. Hiukkassuihkon tapauksessa dispersioyerhälön ratkaisuna saadaan $\omega = \tilde{\omega} + \delta$, missä $\tilde{\omega}$ on emittoituvan aallon taajuus ja δ on hiukkassuihkon aiheuttama häiriötermi ($\tilde{\omega}$ esiintyy vain tässä yhteydessä).

Tarkastelemalla edelleen hiukkasten kineettistä energiota suihkussa, kun $N_p = 5 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$ $L = 4$, päädytään energiaväliin 8–533 keV, joka on matalaenergiseltä osaltaan suunnilleen sama kuin Pc 1-aaltoihin liittyvien protonien energia-alue. Esimerkiksi PARADY (1974) on esittänyt ~ 20 keV protonien olevan mahdollinen vuorovaikutushiukkanen vihellysmoodin aalloille, joiden taajuus on suurempi kuin f_{LHR} ja joiden etenemiskulma on suuri.

NEUFELD and WRIGHT (1964) mukaan protonisuihkun ja vihellysmoodin aallon vuorovaikutus voi tapahtua, kun protonisuihkun nopeus yhtyy aallon ryhmänopeuteen ($u = v_g$). Tällaisia nopeuksia on kaksi, joita vastaavat taajuudet ovat

$$\begin{cases} \omega_1 \sim \frac{1}{2}\omega_{He} \\ \omega_2 \sim 2\omega_{Hi}. \end{cases} \quad (4.40)$$



Kuva 4.11 Epästabiliit taajuusalueet ω_1 :n (alempi) ja ω_2 :n (ylempi) ympäristössä, kun protonin syklotronimoodia kuvaava suora on vihellysmoodia kuvaavan käyrän tangentti. (GENDRIN, 1965)

GENDRIN (1965) on esittänyt, että vuorovaikutus tapahtuu itseasiassa laajalla taajuusalueella taajuuksien ω_1 ja ω_2 ympäristössä (kuva 4.11). Huolimatta siitä, että lausekkeessa (4.37) vahvistus on laskettu 1000 km:iä kohti, voi vuorovaikutus tapahtua huomattavasti pitemmälläkin matkalla, vaikka ympäröiva plasma ei olisikaan tasaisesti jakautunut.

Viime aikoina vihellysmoodin aaltojen ja ionisuihkujen välistä vuorovaikutusta ovat tutkineet teoreettisesti esimerkiksi WONG and GOLDSTEIN (1988), AKIMOTO and WINSKE (1989) ja KOZYRA *et al.* (1994).

Yleisesti tarkasteltuna vihellysmoodissa etenevän aallon ja protonisuihkun välinen vuorovaikutus on periaatteessa identtinen Alfvén-moodissa etenevän aallon ja elektronisuihkun välisten vuorovaikutuksen kanssa. Tällöin syntyvät emissiot ovat kuitenkin paljon VLF-taajuuksia alempana. OBAYASHI (1965) on esittänyt jälkimmäisen vuorovaikutuksen eräänä mahdollisuutena Pc 1-pulsaatioiden vahvistumiselle. Se on myös yksi mahdollinen elektronien presipitaatiomekanismi.

4.4 SI- ja SSC-pulsseihin liittyvä kuoro

Napa-alueen kuoro on näennäisesti pysyvä päiväpuolen ilmiö, jonka kesto voi olla muutamista kymmenistä minuuteista muutamiin tunteihin. Tämä kuoron ominaisuus voidaan selittää elektronien syklotroniepästäbilisuudella magnetosfärissä.

HAYASHI *et al.* (1968), SATON (1980) ja GAIL *et al.* (1990b) esittämät tulokset äkillisen impulssin vaikutuksista napa-alueen kuoroon osoittavat VLF-ilmiön syntyn tarvittavien olosuhteiden olevan olemassa magnetosfärin puristustilan yhteydessä. Äkillinen impulssi selitetään magnetosfärin kokoonpainumisena tai laajenemisena aurinkotulessa tapahtuvien muutosten vaikutuksesta. Magnetosfärin nopea puristuminen, joka havaitaan positiivisena impulssina, aiheuttaa anisotropiaa elektronien pitch-kulmajakautumassa magneettikenttää vastaan kohtisuorassa suunnassa. Ekvatoriaalisen magneettivuon tiheyden kasvu maan magneettikentässä nostaa f_{max} :ia ja vastaavasti B :n pienentämisen laskee f_{max} :ia. Intensiteetin lasku negatiivisen impulssin aikana voidaan selittää pitch-kulma-anisotropian vähentämisen magneettikentän voimakkuuden pienentyessä.

Kuoron taajuuden muutos liittyy resonanssipisteeseen muuttumiseen syklotroniepästäbilisuudessa, mikä johtuu paikallisen gyrotaajuuden muutoksesta magneettisen vaihtelun aikana. Päiväpuolen magnetosfärissä äkilliset impulssit havaitaan yleensä voimakkuudeltaan kaksinkertaisina verrattuna maapintahavaintoihin (NISHIDA and CAHILL, 1964).

Elektronisyklotroniepästäbilisuuden kasvu voidaan tarvittaessa edelleen laskea KENNELL and PETSCHEKIN (1966) mukaan. HAYASHI *et al.* (1968) ovat osoittaneet, että magneettisen kompressionin aikana vahvistuneiden VLF-aaltojen taajuus kasvaa yhtälöiden (3.1) ja (3.2) mukaisesti. Vastaava kasvu voidaan havaita myös kuvista 3.2-3.7 (sivut 31-35). Omat ja japanilaisten tulokset on yhdistetty kuvaan 3.8. GAIL *et al.* (1990b) rekisteröinneissä South Polen, Siplen ja Palmerin asemilla SSC:hen liittyvien VLF-kuorojen ylärajataajuudet olivat lähes samat, mutta alarajataajuus kasvoi leveysasteen pienentyessä. He havaittivat myös noin 75 %:iin tutkimistaan tapauksista liittyvän vaimenevan amplitudimodulaation, jonka jaksonpituuus oli 60-90 s.

Keskitaajuuden lisäksi myös kuoron intensiteetti kasvaa voimakkaasti. GAIL *et al.* (1990b) ovat rekisteröineet jopa 30 dB:n intensiteettikasvun, kun tyypillisesti kasvu on ollut noin 15 dB. Samaa suuruusluokkaa olevia voimistumisia on havaittu Suomessakin.

Äkilliset impulssit etenevät maapinnalle Alfvén moodin aaltona, joiden etenemisnopeus magnetosfärissä on tyypillisesti 10^3 km/s. Toisaalta vihellysmoodissa etenevän aallon nopeus magnetosfärissä on $\sim 10^4$ km/s. Siten aikaero kuoron muutosten ja siihen liittyvän magneettisen pulssin välillä on 30 sekuntia tai enemmän, mikäli kuoron lähdealue on kaukana magnetosfärissä. YACHMENEV *et al.* (1989) mukaan äkilliseen impulssiin liittyvät VLF-ilmiöt ovat havaittavissa hyvin laajalla longitudinalueella (jopa $\pm 50^\circ$).

Verrattaessa ennen SSC:tä rekisteröityjä VLF-aaltoja noin 10 minuuttia SSC:n jälkeen

rekisteröityihin niissä on havaittu selviä eroja (GAIL *et al.*, 1990b). Tämä käy ilmi myös GAIL *et al.* (1990a) teoreettisesta tarkastelusta, jossa he ovat tutkineet eri parametrien vaikuttuksia toisiinsa SSC:n aikana. Parametreja, joissa tapahtuvia muutoksia tutkittiin olivat gyrotaajuus ekvaattorisessa, vuorovaikutusalueen pituus, aallon magneettivuon tiheys, hiukkasten resonanssienergia ja kasaantumiskerroin. Parametrit, joiden vaikutusta edellisiin tutkittiin, olivat normalisoitu taajuus (f/f_H), pitch-kulma, MLT, magneettinen leveysaste (Λ), magnetopausin sijainti ennen ja jälkeen SSC:tä. Merkittävimmät muutokset liittyvät MLT:n ja Λ :n vaihteluun siten, että gyrotaajuus on korkein keskipäivällä matalilla leveysasteilla ja alhaisin yöllä korkeilla leveysasteilla, aallon B on suurimmillaan aamulla korkeilla leveysasteilla ja suurin hiukkasten resonanssienergia tarvitaan keskipäivällä matalilla leveysasteilla.

Vertaillessaan omia havaintojaan PERONAN (1972) teoreettisiin arvoihin GAIL *et al.* (1990a) löysivät vain muutamia eroja. Selvimmin poikkeamat liittyvät vaihteluväleihin, jotka GAIL *et al.* (1990a) tutkimuksessa ovat huomattavasti suuremmat.

Yksityiskohtainen teoreettinen tarkastelu ei äkilliseen impulssiin liittyvien VLF-ilmiöiden tarkastelussa ole helppoa, koska muuttuvia parametreja on paljon. Jo pelkäään yksittäisten parametrien vaihtelu impulssin yhteydessä on hankala tutkittava. Kun tutkimukseen lisätään eri asioiden vuorovaikutukset ja ulkoiset tekijät, kuten PLHR, ollaan lähes mahdottoman tehtävän edessä. Toisaalta käyttämällä olemassa olevia malleja voidaan useiden parametrien vaikutukset jättää huomiotta ja näin yksinkertaistaa tarkastelua.

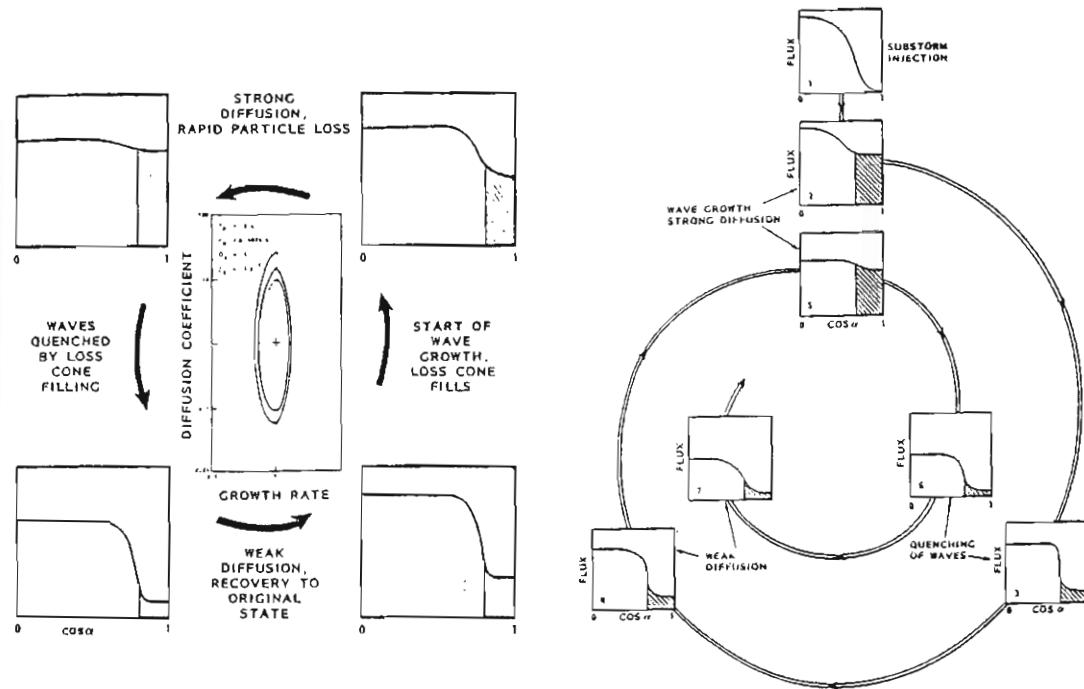
4.5 Pc 1–4-aaltoihin liittyvien VLF-ilmiöiden synty

Magneettisiin pulsaatioihin liittyviä VLF-ilmiöitä on tutkittu lähinnä Pc 3–4-pulsaatioiden osalta (esim. CARSON *et al.* (1965); SATO and KOKUBUN, 1981; SATO and FUKUNISHI, 1981). Se on hyvin luonnollista, koska tällöin magneettisen pulsaation aiheuttama VLF-aaltojen modulaatio on helppo havaita. Vastaavaa ei kuitenkaan ole löydetty Pc 1–2-pulsaatioiden ja VLF-aaltojen vuorovaikutuksesta, vaikka CORONITI and KENNEL (1970) ovatkin esittäneet sillä mahdollisen teorian. Tästä syystä mahdollista vuorovaikutusta on tutkittava eri lähtökohdista.

Revontulipulsaatioihin liittyviä teorioita (mukaan lukien VLF-aallot) ovat tutkineet esimerkiksi DAVIDSON (1986a,b), DAVIDSON (1990), DAVIDSON and CHIU(1991) ja DEMEKHOV and TRAKHTENGERTS (1994). He ovat kiistatta todenneet VLF-emissioiden liittyvän olenaisesti revontulipulsaatioihin. Vaikka luvussa 3 ei olekaan esitetty vastaavia suomalaisia rekisteröintejä, on tässä yhteydessä syytä hieman tarkastella kyseisiä tutkimuksia.

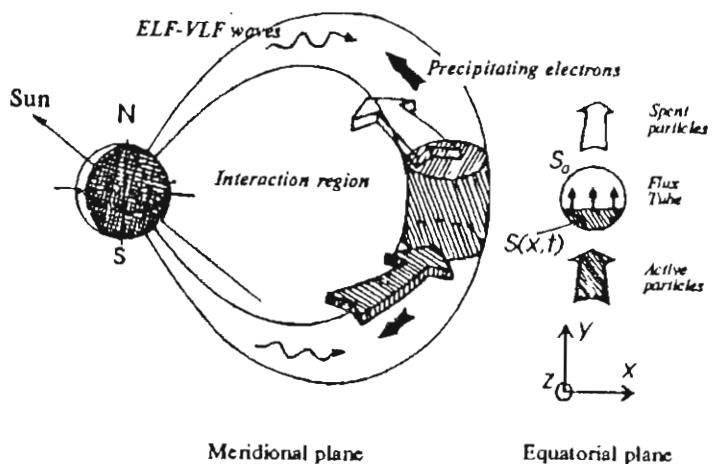
DAVIDSON (1986b) on esittänyt aaltojen vahvistumista ja hiukkaspresipitaatiota kuvaavan relaksaatio-oskillaattoriin mallin. Jos aallon vahvistuminen riippuu pääasiassa häviökartion reunan lähellä esiintyvistä gradienteista paikka-nopeusjakaumissa, häviökartion täyt-

tyminen aiheuttaa aaltojen heikkenemistä. Aallon voimistuminen ja hiukkasten presipitoituminen johtavat lähes isotrooppiseen jakaumaan, joka leikkautuu tyhjän häviökartion reunalla. Tämän vuoksi aaltojen voimistuminen estyy. Tällöin aaltonaikasvuorovaikuttusalueelle konvektion tai ajautumisen seurauksena tulevat uudet hiukkaset kasvattavat anisotropiaa sellaiseen pisteesseen, jonka jälkeen aallot alkavat uudelleen vahvistua, ja alkaa uusi jakso. Kuvassa 4.12a on esitetty kaaviokuva relaksatio-oskillaattorista. Vertailun vuoksi kuvassa 4.12b on esitetty kaaviokuva tilanteesta, jossa uudet hiukkaset ovat seurausta revontulialimyrskystä.



Kuva 4.12 a) Kaaviokuva relaksatio-oskillaattorista (DAVIDSON, 1986b).
b) Revontulialimyrskyn liittyvä vastaava kaaviokuva
(DAVIDSON *et al.*, 1988)

DEMEKHOV and TRAKHTENGERTS (1994) ovat esittäneet revontulipulsaatioiden syntyn oman syklotronimaser-mallinsa. Siinä plasmakanava tarjoaa kvasi-optisen resonaattorin vihellysmoodin aalloille. Kun aallonpituuus on likimain sama kuin plasmakanavan halkaisija, aallot jäätävät plasmakanavaan muodostaen eräänlainen maserin kanavan päiden välille. Heidän arvioidensa perusteella revontuliläiskän halkaisija on tällöin yhtä suuri kuin aallonpituuus. Mallin runkona on ajatus, että läiskän "on"-aika määräytyy syklotroni-epästabiilisuuden kehitymisestä, mikä on suunnilleen aallon etenemisaika pallonpuolisesta toiselle. Vastaavasti "off"-aika määräytyy vapaan energian varastoitumisajasta maseriin. Malli tarjoaa myös johdonmukaisen selityksen kokeellisesti havaittuihin revontulipulsaatioiden leveys- ja pituuspiireistä riippuviihin ominaisuuksiin. Kaaviokuva syklotronimaserista on esitetty kuvassa 4.13.



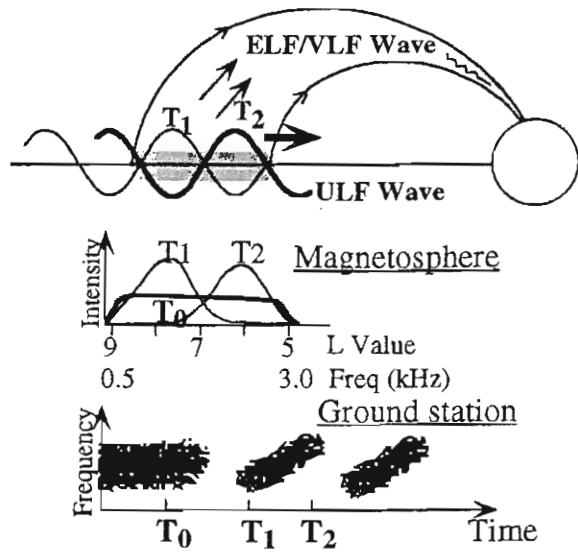
Kuva 4.13 Kaaviokuva syklotronimaserista (DEMEKHOV and TRAKHTENGERTS, 1994)

I. Pc 3-4

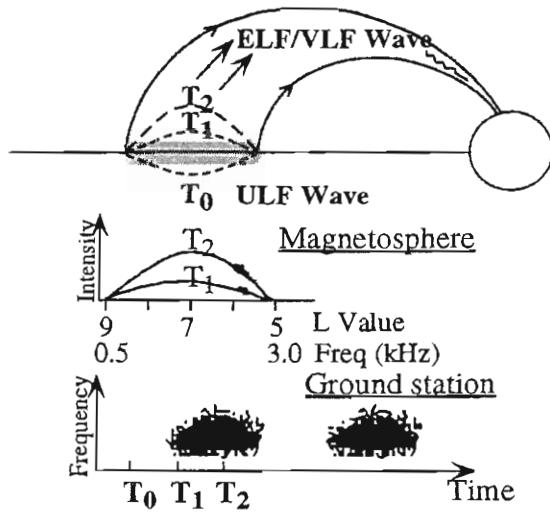
SATO and FUKUNISHI (1981) ovat esittäneet yksinkertaisen mallin avulla, miten Pc 3-4 pulsaatiot aiheuttavat taajuudeltaan nousevia kuoropurskeita (kuva 4.14) ja ei-dispersiivisiä kuoropurskeita (kuva 4.15). Kun magneettikenttää puristavaa komponenttia ei esiinny, kuoro on jatkuvaa (ajanhetki T_0) laajalla taajuusalueella (0.3–3.0 kHz) ja se liittyy L -kuoriin 5–9. Kuvassa 4.14 aurinkotuulesta ja edelleen magnetopaustista radiaalisesti Maata kohti etenevä ULF-aalto (lähinnä Pc 3) vahvistaa magneettikenttää ensin uloimmilla L -kuorilla ja synnyttää näin sopivat olosuhteet syklotroniepästabiliisuudelle. Tällöin VLF-aallon intensiteetti muokkautuu tilanteen T_1 mukaisesti. Kun ULF-aalto etenee sisemmille L -kuorille, myös VLF-aallon intensiteetti muokkautuu voimakkaammin korkeammilla taajuuksilla ja tilanne on T_2 :n mukainen. Samalla uloimpien L -kuorien alueella magneettikenttä heikkenee. Periaatteessa maanpinnalla havaitun nousevataajuisen kuoron intensiteetin pitäisi olla lähes vakio koko kuoron taajuudella, mutta käytännössä se vaihtelee etenemisoloosuhteista riippuen.

Ei-dispersiiviset kuoropurskeet (kuva 4.15) syntyvät Pc 4-aaltojen muokatessa VLF-aaltojen syntyaluetta magnetosfäärissä. Tilanne on analoginen Pc 3-tapauksen kanssa, mutta nyt ULF-aallon periodi on niin pitkä, että se muodostaa seisovan aallon kuoron syntyaluelle. Näin VLF-aallot moduloituvat hyvin laajalla L -kuorialueella ja intensiteettimaksimi havaitaan kuoron keskitaajuudella. Suomessa rekisteröity tapaus lienee kuvien 4.14 ja 4.15 väliltä, koska se täyttää molempien mallien tunnusmerkit. Kyseinen tapaus on kuvassa 3.9 (sivu 40) sekä MANNINEN *et al.* (1994) tutkimuksessa.

SATO and FUKUNISHIN (1981) mallit eivät ota huomioon varsinaista magneettikenttäviivo-



Kuva 4.14 Yksinkertainen malli, miten Pc 3-4 pulsaatiot aiheuttavat taajuudeltaan nousevia kuoropurskeita. Ylimpänä karkea kuvaus ULF-aallon etenemisestä. Keskellä on esitetty VLF-intensiteetin muutos magnettosfäärisä. Alimpana maapinnalla havaittu VLF-spektri. T₀, T₁ ja T₂ kuvaavat ajanhetkiä. (SATO and FUKUNISHI, 1981)



Kuva 4.15 Yksinkertainen malli, miten Pc 3-4 pulsaatiot aiheuttavat ei-dispersiivisiä kuoropurskeita. Periaate on sama kuin kuvassa 4.14, mutta nyt ULF-aalto on niin pitkäperiodinen, että se muodostaa seisovan aallon L-kuorien 5 ja 9 välillä. (SATO and FUKUNISHI, 1981)

jen resonanssia. Ne näyttävät kyllä selittävän alle 3 kHz:n kuoron moduloitumisen, mutta korkeampitaajuisten (5–8 kHz) emissioiden selittäminen ei enää onnistu. He eivät myöskään vertaa omia mallejaan CORONITIN ja KENNELLIN (1970) malliin.

II. Pc 1–2

CORONITI and KENNEL (1970) ovat tutkineet teoreettisesti tilannetta, jossa esiintyy VLF-taajuisten aaltojen turbulensseja. Tällöin matalataajuiset mikropulsaatiot voivat moduloida voimakkaasti VLF-aaltojen amplitudia. Pulsaatiot häiritsevät diffuusia tasapainoa muuttamalla resonoivien elektronien jakaumaa ja muokkaamalla vihellysaaltojen etene-mistietä.

Jos pulsaation jaksonpituuus on paljon lyhempi kuin presipitaation elinaika, vain hyvin pieni osa elektroneista voi presipitoitua pulsaation taajuudella ja näin vapaata energiota on runsaasti. Toisaalta pulsaatiot moduloivat VLF-aaltoja hyvin voimakkaasti. VLF-aaltojen amplitudi kasvaa eksponentiaalisesti pulsaation amplitudin kasvaessa. Mikäli pulsaation jaksonpituuus on samaa luokkaa presipitaation elinajan kanssa, VLF-aaltojen vahvistus on vain lineaarisesti riippuva pulsaation amplitudista. (CORONITI and KENNEL, 1970)

Kuvassa 3.10 on esitetty kaksi esimerkkiä vihellyksen liipaisemista korkeataajuisista kuoroista. Ilmiöt tekee mielenkiintoiseksi havainto, että mikäli korkeataajuisia kuoroja on esiintynyt, on ollut poikkeuksetta myös Pc 1-aktiivisuutta. Tilanne ei kuitenkaan padee toisinpäin. GONCHAROVA *et al.* ovat käsitelleet joitakin korkeataajuisen kuoron syntymalleja ja he tuovat esiin mahdollisen yhteyden Pc 1–2-pulsaatioiden kanssa, mutta varsinaista vuorovaikutusta he eivät ole tutkineet.

Yksi mahdollinen syntymalli saattaisi olla seuraava. Vihellysaallon vuorovaikuttaessa magnetosfäärissä energettisten elektronien kanssa elektronien pitch-kulma muuttuu hie-man, mutta kuitenkin riittävästi, jotta elektronit poikkeavat radaltaan. Energeettisten elektronien vuorovaikuttaessa tämän jälkeen Pc 1-aallon kanssa emittoituu VLF-taajuisia aaltoja (diskreettejä emissioita). Tällöin Pc 1-aalto muuttaisi elektronien energijakau-maan tavalla tai toisella, mikä ilmenisi anisotropian kasvuna. Näin syntynyt vapaa energia syötettiisiin yksinkertaisesti VLF-emissioille, jolloin voisi syntyä maanpinnalla havaittava korkeataajainen kuoro. Jos Pc 1-aallon aallonpituuus oletetaan noin 2000 km:ksi ja elektronien nopeudeksi noin 200 000 km/s, saadaan diskreettien emissioiden aikaeroksi $\Delta t = 10$ ms, eli vähemmän kuin havainnoissa. Edellä mainittujen parametrien vaihteluvälistä johtuen todellisuudessa aikaeroksi saattaa tulla 100 ms tai jopa enemmän, mikä on samaa suuruusluokkaa kuin havainnoissa.

Esitetty ajatuskuvio ja laskelmat perustuvat siihen, että vuorovaikutus tapahtuu ekvaatorialueella. HELLIWELL *et al.* (1980) ovat havainneet konjugaattipisteissä ilmiön alkamisessa noin sekunnin viiveen. Tämä osoittaa, että emissiopurske ei ole edennyt molempien suuntiin samanaikaisesti. Viive on samaa luokkaa kuin vihellyskaikujen väli. Se voi

tarkoittaa, että emissiopurske etenee vain samaan suuntaan kuin vihellys.

Konjugaattihavainnoissa on mielenkiintoista myös se, että vihellys on havaittu vain toisella pallon puoliskolla, mutta emissiopurske molemmilla. Tammikuun 1993 havaintojen perusteella ei voi tehdä johtopäätöstä, että kaikki vihellykset olisivat lähtöisin samalta pallonpuoliskolta tai että toisen hypyn vihellystä ei havaittaisi emissiopurskeen yhteydessä (ks. HELLIWELL *et al.*, 1980, kuva 2).

Toisaalta varsinaista vuorovaikutusta VLF-aaltojen ja Pc 1-pulsaatioiden välillä ei välttämättä tapahdukaan. Tällöin magneettinen pulsaatio toimisi vain indikaattorina sellaisille magnetosfäärисille olosuhteille, joissa vihellys voi liipaista korkeataajuisen kuoron. Pc 1-pulsaatioiden esiintyminen ei vielä takaa korkeataajuisen kuoron esiintymistä, mutta mikäli korkeataajuisia kuoroja on esiintynyt, on ollut poikkeuksetta myös Pc 1-aktiivisuutta. Kuvassa 3.11 on esitetty korkeataajuisten kuorojen ja emissioiden sekä Pc 3- ja Pc 1-pulsaatioiden esiintyminen aamutuntien aikana marraskuun 1993 kampanjassa.

Vihellyksen liipaiseman kuoron kokonaiskesto maanpinnalla on lähes sama kuin Pc 1-helmen kestoaika. Toisaalta VLF-aaltojen ja Pc 1–2-aaltojen vuorovaikutusta on tutkittu teoreettisesti useissakin tutkimusryhmissä, mutta kokeelliset havainnot puuttuvat (ellei sellaiseksi lasketa kuvan 3.13 tapausta). Teoreetikkojen mielestä VLF-aallon pitäisi moduloitua Pc 1-aallolla, jolloin jostakin VLF-aallon parametrista pitäisi luonnollisesti löytyä Pc 1-aallon taajuus (0,2–5 Hz). (Edellä esitettyt pohdinnat perustuvat keskusteluihin mm. Prof. Helliwellin, Prof. Inanin, Prof. Hayakawan sekä venäläisten kollegojen kanssa, 1993).

4.6 Suhinan teoriaa

Suhinan ja revontulisuhinan synty on selitetty vuosikymmenten ajan vain hiukkasten Cerenkov-säteilyn avulla. Kuitenkin SONWALKAR and INAN (1988 ja 1989) sekä DRAGANOV *et al.* (1992) ovat esittäneet lukuisia satelliiteissa rekisteröityjä havaintoja, joissa perinteiset syntyteorian eivät päde. Heidän havaintonsa liittyvät vihellysten aiheuttamiin suhinoihin. DRAGANOV *et al.* (1992) toivat lisäksi esille aivan uuden näkökulman, jonka mukaan kanavoitumaton vihellys voi dispersioita kokiessaan ”venyä” tunnistamattomaksi suhinkaksi.

SAZHIN *et al.* (1993) ovat koonneet revontulisuhinaan liittyvät tutkimukset kattavaan review-artikkeliin, jossa käydään läpi koko revontulisuhinan historia. Tässä yhteydessä on siksi keskitytty sellaisiin suhinoihin, jotka eivät ole ”puhtaita” revontulisuhinoita.

4.6.1 Suhinan lähteet

Sekä HUANG *et al.* (1983) että THORNE *et al.* (1973) toteavat yksityiskohtaisten sädetielaskelmensa (ray tracing) perusteella, että suhinan paikallinen lähde (terminen kohina) ei

ole yhtäpitävä suhinan havaitun intensiteettitason kanssa. Siksi he olettavat, että jossakin magnetosfäärin osassa on olemassa jokin voimakas tuntematon lähte.

Magneettikentän suuntaisesti etenevien aaltojen syklotroniresonanssin suurin vahvistus on ekvaattorilla juuri plasmapausin sisäpuolella (LYONS and WILLIAMS, 1984). Siksi ekvaattorialue, kentän suuntainen eteneminen ja L -arvo 4 ovat suotuisia parametreja alkeislähteelle. MUZZIO and ANGERAMI (1972) osoittivat, että ekvaattorialue kontrolloi suhinan ylempää rajataajuuutta.

CAIRO and LEFEUVRE (1986) ovat kokeneet tarpeelliseksi suhinan etenemisen havainnollistamisen 3-ulotteisesti. Käytännössä he ovat osoittaneet, että 2-ulotteinen geometria on järkevä vain, kun aaltojen etenemiskulma magneettikentän suhteen on hyvin pieni. Kuitenkin on havaittu, että edellä mainitun analyysin tulokset pätevät vain magnetosfäärissä, mutta ne eivät toimi täydellisesti suhteellisen terävässä rajapinnassa, kuten plasmapausissa.

4.6.2 Vihellys suhinan lähteenä

Satelliittilla tehtyjen yli 1500 havainnon perusteella SONWALKAR and INAN (1989) ovat koonneet vihellystä seuraavalle suhinalle viisi peruspiirrettä (huomaa vihellyksen liipaisemien kuorojen erot ja samankaltaisuudet seuraavien kohtien kanssa):

- 1) Vihellystä seuraava suhina esiintyy yleensä taajuusvälillä 1,5–4,0 kHz ja sen kaistanleveys on 1–2 kHz. Alarajan asettuminen 1,5 kHz:iin johtuu käytetyn vastaanottimen alarajataajuudesta.
- 2) Yksittäinen vihellyksen synnyttämä suhina kestää yleensä 10–20 s.
- 3) Suhina syntyy useimmin 1^+ - tai 2^- -vihellyksestä, mutta hyvin harvoin 0^+ - tai 1^- -vihellyksestä (+ tarkoittaa, ettei vihellys ole vielä ylittänyt ekvaattoria, ja – tarkoittaa, että ekvaattori on ylitetty, mutta numeron osoittamaa heijastumista ei ole vielä tapahtunut). Magnetosfäärisesti heijastuneen vihellyksen ja suhinan dispersiot ovat lähes identtiset. Toisinaan ensimmäiseen vihellyskaikuun liittyy heikko suhina, jonka taajuus on yli 4 kHz.
- 4) Vihellykseen liittyvä suhina käyttäätyy kuin vihellysjono, eli intensiteettimaksimit ovat noin kahden hypyn päässä toisistaan ja kokonaisintensiteetti laskee huomattavasti hyppyjen lisääntyessä. Intensiteetin häipyminen hyppyjen välissä havaitaan yleensä vain sähköisellä antennilla, mutta ei magneettisella antennilla (SONWALKAR and INAN, 1988). Päiväpuolen taustasuhinassa havaittavat intensiteettivaihtelut ja vihellyksen aiheuttaman suhinan intensiteettivaihtelut ovat aina samassa vaiheessa.
- 5) Emissioiden ja taustasuhinan sähkö- ja magneettikentän amplitudit ovat samaa luokkaa myös silloin, kun vihellyksiä ei havaita.

SONWALKAR and INAN (1989) ovat havainneet vihellyksien aiheuttamien suhinoiden esiintyvän pääasiassa iltapäivällä, kun magneettinen aktiivisuus on hyvin heikko. He esittä-

vät, että vihellyksen aiheuttamat suhinat saattavat olla hyvin tärkeässä asemassa ≤ 45 keV hiukkasten häviössä säteilyvyöhykkeistä. PARADY (1974) on esittänyt rengasvirran anisotrooppisen jakauman (maksimi 20 keV) olevan epästabili vihellysmoodin aalloille, joiden taajuus on suurempi kuin f_{LHR} ja joiden normaalilin suunta (wave normal angle) on suuri. Hän esittää yhteenvetona:

- 1) Tietynkaltainen kuumien protonien jakauma on epästabili aallolle, jonka taajuus on lähellä tai suurempi kuin f_{LHR} .
- 2) Aallon vahvistuminen tapahtuu suurilla aallon normaalilin suunnilla ($k_x > k_z$).
- 3) Vuorovaikuttavien protonien pitch-kulma on suuri.
- 4) Kun aalloille siirtyy energiaa protonien v_{\perp} -osasta, protonien presipitaatio kasvaa.

Tämä on itseasiassa hyvin varteenton tyyppinen suhinan syntymekanismi (SONWALKAR and INAN, 1989). HUANG *et al.* (1983) ja CHURCH and THORNE (1983) esittävät, ettei syklotroniresonanssi (vahvistus) eikä Landau-vaimennus pysty selittämään suhinan syntymisestä pelkän taustasäteilyn pohjalta.

Luvussa 3 esitettyjen vihellyksen aiheuttamien kuorojen synty voi liittyä juuri vastaavaan vuorovaikutukseen. Kuvassa 3.10 esitetyt esimerkit saattaisivat sopia hyvin PARADYN (1974) kriteereihin, mutta lisäksi tarvittaisiin hiukkashavaintoja. On myös muistettava, että vihellysten aiheuttamia kuoroja on Suomessa havaittu vain, kun magneettinen aktiivisuus on pieni ja kun on havaittu Pc 1-aaltoja.

Ajatus vihellyksestä syntyyvälle suhinalle perustuu DRAGANOV *et al.* (1992) tutkimuksiin. Heidän tutkimuksensa sai alkusyksyn SONWALKAR and INANIN (1989) havainnoista, joissa todettiin suhinan seuraavan useissa tapauksissa vihellystä. DRAGANOV *et al.* (1992) esittävät, että vihellys voi muovautua suhinaksi koettuaan lukuisia magnetosfäärisiä heijastumisia. Perusteluina heillä on vihellyksien pitkä elinaika magnetosfääriissä, mikä tarjoaa mahdollisuuden aallon varastoitumiseen jonkinlaiseen magnetosfääriseen resonaattoriin. Toisaalta CHURCH and THORNE (1983) ovat osoittaneet, että luonnollinen epäkoherenti säteily magnetosfäärin plasmassa on hyvin epätodennäköistä, mutta mikäli emissio on kerran syntynyt, se voi kestää pitkään. DRAGANOV *et al.* (1992) havaittivat vihellyksestä syntyyvän suhinan kestoajan olevan jopa 100 sekuntia.

Vihellyksen liipaisemiin korkeataajuisiin kuoroihin liittyy toinenkin mielenkiintoinen piirre, joka havaitaan myös kuvassa 3.10. Ylempi kuoro on lähes yksinomaan suhinaa ja vastaavasti alempi koostuu puhtaasti diskreeteistä emissioista. Useimmat tapaukset ovat näiden yhdistelmiä. Vidaankin perustellusti kysyä, ovatko suhina ja diskreetit emissiot syntyneet täysin eri mekanismeilla. Kyseessä voisivat pikemminkin olla eri magneettikentän voimaviivaa etenevät ilmiöt, jolloin suhina etenisi huomattavasti kauempana rekisteröintipaikan kentäviivasta kuin diskreetit emissiot. Toisaalta vihellyksen etenemistie ja vihellyksen liipaiseman kuoron etenemistie voivat olla hyvinkin etäällä toisistaan, mikä puolestaan selittäisi analyysin antaman vihellyksen etenemistien ($L \sim 3,8$) ja korkeataajuisten emissioiden etenemistien ($L \sim 5-6$) välisen eron.

Edellä esitettyt uudentyyppiset suhinan syntymekanismit avaavat mahdollisuksia Cerenkov-säteilylle perustuvien teorioiden laajentamiseen. Perinteinen revontulisuhta selittyykin hyvin Cerenkov-säteilyllä, mutta monien suhteellisen lyhytkestoisten suhinoiden ymmärtäminen vaatii jonkin ulkoisen liipaisijan. Esimerkiksi kuvassa 3.12 esitettyjä kapeakaistaisia suhinoita ei voitane sovittaa Cerenkov-säteilyyn ilman rajoittavia alkuoletuksia (kuten esimerkiksi hiukkasten energiajakauman oltava hyvin kapea ja vuorovaikutusolosuheteiden pitää säilyä muuttumattomana useita minuutteja). Toisaalta ne tässä tapauksessa liittynevät PLHR:iin. Myös kuvassa 3.13 PLHR:iin liittyvä suhina noin 3 kHz:n taajuudella on vaikea selitettävä, sillä siinä ei havaita ollenkaan samanlaisia intensiteettivaihteluita kuin alle 2 kHz:n ja yli 5 kHz:n taajuksilla. Siis ihmisen toiminnan vaikutuksia ei ole syytä aliarvioida VLF-ilmiöiden yhteydessä.

4.7 Yhteenveton teorioista ja niiden merkityksestä

I. Etenemismoodit

Sähkömagneettisten aaltojen ominaisuuksia voidaan tarkastella magnetoionisen teorian avulla. Vaikka se ei otakaan huomioon hiukkasten lämpöliikettä eikä ionien vaikutusta, sen avulla voidaan johtaa sähkömagneettisen aallon dispersioyhtälö magnetoituneessa plasmassa. Tätä yhtälöä kutsutaan Appleton-Harteen yhtälöksi.

$$n^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + 4Y_L^2(X-1)^2}}. \quad (4.3)$$

Tässä yhteydessä on tarkasteltu lähemmin vihellysmoodia, joka on heijastuspisteeton orđinaarimoodi ja jonka n^2 on aina positiivinen. Vihellysmoodi esiintyy taajuksilla $f \leq f_{He}$ tai $f \leq f_{pe}$ riippuen siitä, kumpi taajuus on pienempi.

II. Vihellysmoodin eteneminen plasmassa

Vaikka elektronit vaikuttavat vihellysmoodin etenemiseen eniten, myös ionien esiintymisen etenemistä pitää ottaa huomioon. Ionien merkittävin vaikutus liittyy siihen, että niiden liike sallii poikittaisen etenemisen vihellysmoodin aallolle, jonka taajuus on alle f_{LHR} . Useissa tapauksissa vihellysmoodin etenemistä voidaan kuvata ns. kvasi-longitudinaalisen (QL) approksimaation avulla. Tällöin Appleton-Hartteen yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - |Y_L|}. \quad (4.14)$$

Periaatteessa QL-approksimaatio pätee vain pienillä etenemiskulmilla, mutta silloin kun $f_p^2/ff_H \gg 1$ (esimerkiksi plasmapausin ulkopuolella etenevien emissioiden yhteydessä), se pätee myös hyvin suurilla θ :n arvoilla.

III. Aalto-hiukkasvuorovaikutus

Vihellysmoodin aallon ja hiukkasten vuorovaikutuksessa esiintyy kaksi eri resonanssityyppiä, joista ensimmäinen liittyy pitkittäiseen nopeuskomponenttiin (siitä käytetään myös nimityksiä Landau- tai Cerenkov-resonanssi). Toinen resonanssityyppi liittyy poikittaiseen nopeuskomponenttiin (siitä käytetään myös nimitystä syklotroniresonanssi). Nämä voidaan esittää muodossa

$$f - \frac{1}{2\pi} k_{\parallel} v_{\parallel} = 0 \quad \text{ja} \quad (4.21)$$

$$f - \frac{1}{2\pi} \gamma k v_{\parallel} = \mp b f_{Hi,e}. \quad (4.25)$$

Aalto-hiukkasvuorovaikutukseen liittyy myös termi anisotropia (A), jolla kuvataan hiukkaspopulaation energian jakautumista kentänsuuntaiseen ja poikittaiseen komponentteihin. Poikittainen resonanssi on mahdollista, kun anisotropia ylittää kriittisen arvon A_c .

Resonoivien hiukkasten minimienergiaraja kentän suunnassa saadaan lausekkeesta

$$W_{\parallel} = \frac{B^2}{2\mu_0 N} \frac{1}{A_c(A_c + 1)^2}. \quad (4.30)$$

Kuvista 4.8a-d voidaan havaita, että magneettinen aktiivisuus vaikuttaa merkittävästi aaltohiukkasvuorovaikutukseen osallistuvien hiukkasten minimienergiaan.

HELLIWELL (1967) on esittänyt edelleen hyvänä pidettävän mallin diskreettien emissioiden synnystä ja spektrumuotojen riippuvuussuhteesta vuorovaikutusalueen liikkeisiin.

Protonien ja VLF-aaltojen vuorovaikutusta on tutkittu huomattavasti vähemmän (vain 1960-luvulla) kuin elektronien ja VLF-aaltojen vuorovaikutusta. Kuitenkin teoreettiset laskelmat osoittavat mahdollisiksi vuorovaikutustaa juuksiksi ekvaattorialueella $\sim \frac{1}{2} f_{He}$ ja $\sim 2 f_{Hi}$.

IV. SI- ja SSC-pulsseihin liittyvä kuoro

Äkillinen impulssi selitetään magnetosfäärin kokoonpainumisena tai laajenemisena aurinkotulessa tapahtuvien muutosten vaikutuksesta. Magnetosfäärin nopea puristuminen, joka havaitaan positiivisena impulssina, aiheuttaa anisotropiaa elektronien pitch-kulmajakautumassa magneettikenttää vastaan kohtisuorassa suunnassa. Ekvatoriaalisen magneettivuon tiheyden kasvu maan magneettikentässä nostaa f_{max} :ia ja vastaavasti B :n pieneminen laskee f_{max} :ia. Intensiteetin lasku negatiivisen impulssin aikana voidaan selittää pitch-kulma-anisotropian vähennemisellä magneettikentän voimakkuuden pienentyessä.

Äkilliseen impulssiin liittyvien VLF-aaltojen voimakkuus ja spektrumuoto riippuvat mm. rekisteröintipaikan magneettisesta paikallisajasta ja leveysasteesta. Aallot ovat voimak-

kämpia aamulla korkeilla leveysasteilla. Toisaalta keskipäivällä matalilla leveysasteilla vuorovaikutukseen tarvitaan suurempi hiukkasten resonanssienergia kuin muulloin.

Magneettisiin impulsseihin liittyvät VLF-ilmiöt ovat hyvin yleisiä päiväpuolella. Niitä onkin tutkittu runsaasti. Havaitut VLF-ilmiöt koostuvat yleensä voimakkaasta suhinasta ja joissakin tapauksissa diskreeteistä emissioista. Eri syntymekanismien erottelminen on vaikeaa, sillä magneettisen impulssin vaikutukset levivät hyvin laajalle alueelle. Tässä yhteydessä voidaan myös kysyä, tarvitseko suhinan ja diskreettien emissioiden synty selittää eri teorioilla. Kenties suhina onkin vain laajalta alueelta peräisin olevien diskreettien emissioiden muodostamaa kohinaa.

V. Pc 1-4-aaltohin liittyvien VLF-ilmiöiden synty

Tässä yhteydessä on esiteltty myös revontulipulsaatioihin liittyvät VLF-ilmiöt. DAVIDSON (1986b) on esittänyt aaltojen vahvistumista ja hiukkaspresipitaatiota kuvavan relaksatio-oskillaattorin, joka on kuvassa 4.12a. Vastaavasti DEMEKHOB and TRAKHTENGERTS (1994) ovat esittäneet revontulipulsaatioiden syntyn oman syklotronimaser-mallinsa, jolla heidän mielestään voidaan selittää läiskien "on"- ja "off"-ajat sekä pituus- ja leveyspiireistä riippuvat erot.

Magneettisiin pulsaatioihin liittyy erilaisia VLF-ilmiöitä, joista parhaiten tunnetaan Pc 3-4-pulsaatioiden yhteydessä esiintyvän kuoron modulaatio (SATO and FUKUNISHI, 1981). Korkeataajuisten pulsaatioiden vaikuttuksia VLF-aaltoihin on tutkittu teoreettisesti (esimerkiksi CORONITI and KENNEL, 1970), mutta vakuuttavat kokeelliset havainnot puuttuvat (ellei sellaiseksi tulkita kuvan 3.13 tapausta).

VI. Suhinan teoriaa

Viimeaikoina vihellyksen merkitys suhinan synnyssä on lisääntynyt. Vihellys voi toisaalta toimia liipaisijana, ja toisaalta se voi lukuisten magnetosfääristen heijastumisten yhteydessä kokea dispersiota niin paljon, että se havaitaan vain tunnistamattomana suhinaan.

Vihellyksen liipaisemat suhнат esiintyvät yleensä magneettisesti rauhallisina iltapäivinä (ei kuitenkaan kappaleen 3.2.4 tapaukset). Tämä saattaa myös liittyä vihellysaallon ja protonien vuorovaikutukseen. Vihellysten liitämistä suhinoiden syntyn voidaan perustella helposti vihellysten suarella määrellä magnetosfääriissä. Kun maanpinnalla tapahtuu noin 100-120 salamaniskua sekunnissa ja kun muistetaan, että yli 90 % vihellyksistä on kanavoitumattomia, potentiaalisia suhinan liipaisijoita tai synnyttäjiä on magnetosfääriissä riittämiin. On itse asiassa ihme, ettei tähän vaihtoehtoon ole paneuduttu enempää.

Varsinaisesta revontulisuhinasta saa parhaimman kuvan SAZHIN *et al.* (1993) artikkelistä.

5. TULEVAISUUDEN SUUNNITELMIA

5.1 Avaruusfysiikan tutkimus

Luonnon itsensä synnyttämissä VLF-ilmiöissä riittää vielä pitkäksi aikaa tutkimista, mutta teorioiden kehittyminen edellyttää kontrolloitujen kokeiden tekemistä. Tällöin kyseeseen tulevat heating-kokeet, joissa lähetetään voimakas radiosignaali ionosfäärin ja vastaanotetaan syntyviä VLF-aaltoja. Kun lähetetyn radiosignaalin parametrit tunnetaan ja vastaanotetusta signaalista ne voidaan määrittää, voidaan tutkia VLF-aaltojen syntymekanismeja ja tiettyjä kynnysarvoja niiden syntymiselle.

Vaikka ionosfäärin kuumennuskokeita on tehtykin viimeisen kymmenen vuoden aikana useita, uusia koejärjestelyitä voidaan suunnitella koko ajan. Aiemmissa kokeissa on keskitytty lähinnä modulointisignaalin tutkimiseen ilman, että sen käytäytymistä olisi kytketty muihin geofysikaaliin ilmiöihin. Lisäksi kytkemällä erilaisia kokeita yhteen voidaan löytää ilmiötä, joiden ei pitäisi vaikuttaa toisiinsa. Esimerkiksi vuoden 1993 kuumennuskokeen yhteydessä havaittiin API-kokeen (Artificial Periodic Irregularities) signaali myös VLF-taajuuksilla.

Ionosfäärin kuumentumiseen liittyvä tutkimuskohde on esimerkiksi havaittujen radiolähetysten demodulaatio. Aihetta on sivuttu muutamissa VLF-alan tutkimuksissa (esimerkiksi LAASPERE and JOHNSON, 1973; TURUNEN et al., 1980; CANNON, 1982). Varsinaisen radiolähetyn kuulumiselle ei vielä ole löydetty pitävää selitystä.

Tulevaisuudessa yhdeksi tärkeimmistä lähiavaruuden tutkimuskohteista noussee ihmisen omalla toiminnallaan aiheuttama sähkömagneettinen saastuminen. Esimerkiksi URSI-93-kokouksessa Japanissa tämän saastumisen arveltiin olevan vuosituhannen vaihteeseen mennenä sekä tutkimuksellisesti että sivuvaikutuksiltaan merkittävin perinteiseen geofysiikkaan vaikuttavista ilmiöistä. Kokouksessa todettiin myös, että ihmisen toiminnan vaikutuksia on selvästi aliarioitua viimeisten vuosikymmenien aikana. Joidenkin arvioiden mukaan kyseessä on otsonikatoon verrattava ongelma. Tässäkin työssä on esitetty joitakin esimerkkejä PLHR:in aiheuttamista VLF-ilmiöistä. Mielenkiintoista on, että kyseiset emissiot näyttävät usein olevan riippumattomia esimerkiksi magneettisista häiriöistä.

Tutkimisen arvoista saattaisi olla myös VLF-emissioiden ionosfääristen kanavien kartottaminen. Kokeella pyrittäisiin etsimään emissioiden etenemistä varsinkin revontulien yhteydessä. Tutkimustuloksena voisi esittää esimerkiksi karttapohjalle piirretty revontulimuodot ja rekisteröityjen emissioiden kanavat suhteessa revontuliin. Tällainen koe vaatisi VLBI-mittausjärjestelyn (Very Long Base Interferometer), jossa mittauspisteiden

väli pitäisi olla muutamia satoja kilometrejä. Rekisteröinniltä vaaditaan myös erittäin suurta ajallista tarkkuutta. Lisäksi ortogonaalikanavien välisten vaihe-erojen pitää säilyä muuttumattomina rekisteröintilaitteessa.

Uusien tietokonejärjestelmien ja massamuistien kehittymisen antaa mahdollisuuden pitkäkestoisien ilmiöiden (= suurien datamäärien) tutkimisen. Tällöin koko vuorokauden kestävän EISCAT-mittauksen aineistoa ja VLF-aaltojen vuorokausikäytäytymistä voitaisiin verrata ja selvittää, miten ionosfäärin elektronitiheyden muutokset vaikuttavat VLF-aaltoihin. Tämä tarkoittaisi siirtymistä yksittäisten emissioiden tutkimisesta suuren luokan ilmiöihin. Myös revontuliin liittyvä ilmiömaailma on yhä täynnä tutkittavaa.

5.2 Maaperän tutkimus

VLF-aaltojen käyttöä magnetosfäärin tilan tutkimiseen voitaneen jatkaa edelleen, mutta jonkinlaisten sovellustosten etsiminen saattaa nykyisten rahoitusjärjestelyjen aikana lisätä kiinnostusta avaruusfysiikan käytännön sovellutuksiin. Maaperän karttoittaminen sähkömagneettisia aaltoja käyttäen on varsin tunnettua ainakin Oulun yliopistossa (esimerkiksi MURSU, 1991), joten sovellustosten etsiminen ei liene vaikeaa.

Luonnon VLF-aaltojen käyttäminen voisi tuoda uusia ulottuvuuksia maaperäkartoitukseen, sillä niiden teho ja kestoaike voivat olla hyvinkin suuria. Nykyisin käytössä olevat mittausmenetelmät (yli 10 kHz taajuudet) mahdollistavat maaperälauantuksen 200 metrin syvyydelle saakka. Luonnon signaalit esiintyvät usein myös alle 1,6 kHz:n taajuuksilla, jolloin luotauksessa voitaisiin käyttää näitä taajuuksia ja näin päästääsiin noin kolme kertaa syvemmälle ($\text{tunkeutumissyvyys} \propto 1/\sqrt{f}$). Periaatteessa noin 1 kHz:n taajuuksia voidaan tuottaa myös siirrettävillä VLF-lähettimillä, mutta tällöin lähetystehon on oltava hyvin suuri, mikä puolestaan tekee laitteiston siirtämisen hyvin vaikeaksi. 1,6 kHz:n rajataajuus on merkittävä, sillä matalataajuisemmat aallot eivät etene maa-ionosfäärin aaltoputkessa, jolloin esimerkiksi salamaniskujen käyttö maaperän luotaukseen on mahdotonta. Toisaalta magnetosfääristen signaalien esiintymistä ei voi varmuudella ennustaa, mutta tämä haitta voidaan poistaa suunnittelemalla mittauskampanjat riittävän pitkiksi.

MURSU (1991) on esitellyt tutkielmassaan siirrettävän VLF-lähettimen käyttöä maaperän mittauksissa. Tällaisessa mittausjärjestelyssä vastaanotin pidetään paikallaan ja lähetintä siirretään. Vertailulähteenä hän on käyttänyt JXN VLF-navigointiaseman signaalia (16,4 kHz). Luonnon signaaleja käytettäessä vastaanottimia pitäisi olla vähintään kahdet, joista toiset toimivat referenssvastaanottimina ja toisia siirretään halutun alueen karttoittamiseksi.

Matalilla taajuuksilla (alle 10 kHz) toimittaessa ihmisen aiheuttamat häiriöt, kuten sähkölinjojen synnyttämät verkkoharmoniset ja erilaiset VLF-lähettimet, muodostavat ylimääräisen haittatekijän. Tällöin mittausalueen tulisi sijaita vähintään 10 km:n päässä sähkölinjosta. Toisaalta verkkoharmonisiakin voitaisiin mahdollisesti käyttää hyväksi.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkielmassa on käsitelty VLF-emissioiden suhdetta magneettisiin pulsaatioihin ja magneettisiin impulsseihin. VLF-emissiot jaetaan kuuteen luokkaan: suhinaan, diskreetteihin emissioihin, periodisiin emissioihin, kuoroon, kvasiperiodisiin emissioihin ja liipaistuihin emissioihin. Osalle voidaan vielä määritellä alaluokkia. Vastaavasti hydromagneettiset ilmiöt voidaan jakaa jatkuviin pulsaatioihin (Pc 1-5), epäsäännöllisiin pulsaatioihin (Pi) ja magneettisiin impulsseihin (SI, *sudden impulse* ja SSC, *storm sudden commencement*). VLF-aaltojen tutkimuksen alku juontaa viime vuosisadalle, ja magneettisten aaltojen tutkimus vieläkin kauemmas historiaan.

Esitellyt havainnot on rekisteröity Aktivnyij-satelliittiprojektia varten Sodankylän geofysiikan observatoriossa rakennetuilla vastaanottimilla (antennin tehollinen pinta-ala 126 m²) sekä uusilla vastaanottimilla (1000 m²). Samanaikaisesti on rekisteröity magneettisia pulsaatioita kenttäolosuhteisiin soveltuvalle induktiokelamagnetometrillä ja optisia revontulia TV-kameralla ja diodifotometrillä. Kaikki rekisteröinnit tallennetaan VHS-videonauhalle samaan aikaan, mikä takaa, että ilmiöiden keskinäinen ajoitus on eksakti.

Hydromagneettisten aaltojen vaikutus VLF-aaltoihin näkyy pääasiassa tekijänä, joka moduloi sekä VLF-aaltojen intensiteettiä että taajuuskäytäytymistä. Intensiteettimoduulaatio on selvimmän havaittava vuorovaikutuksen seuraus, mutta se ei liity kaikkiin tapauksiin. Joissakin havainnoissa vuorovaikutuksen osoittaminen vaati syvälliempää analysointia, kuten luvussa 3 on esitetty.

Selvin yhteyks VLF-aaltojen ja magneettisten häiriöiden välillä havaitaan maapallon magneettikentässä esiintyvien SSC:ien ja SI:ien aikana. Tällöin VLF-suhinan taajuus muuttuu äkillisesti. Yleensä suhinan taajuus kasvaa ensin nopeasti noin kaksinkertaiseksi ja sen jälkeen suhina häviää hetkeksi kokonaan. Muutaman sekunnin kuluttua suhina ilmestyy uudelleen ja sen intensiteetti vaihtelee. Havaittavat taajuuskaistat poikkeavat usein siitä, mitä ne ovat olleet ennen magneettista pulssia. Koko ilmiö on ohi muutamassa minuutissa, ja tyypillisesti VLF-taajuudet hiljenevät tämän jälkeen kokonaan jopa tunnin ajaksi.

Kyseessä on aurinkotuulella etenevä shokkirintaman törmääminen magnetosfäärin. Tällöin aaltoniuikkavuorovaikutuksen syntymiseen tarjoutuu erinomaiset mahdollisuudet. VLF-aaltojen intensiteetti kasvaa magnetosfäärin puristuessa Maata kohti. Vastaavasti intensiteetti laskee ja aallot voivat hävitää kokonaan puristustilan lauetessa. Vaikka magneettinen häiriö etenee maapallon ympäri noin minuutissa, ei siihen liittyviä VLF-ilmiöitä ole havaittu koskaan yöpuolella.

Toinen hyvin havaittava yhteys ULF- ja VLF-aaltojen välillä on VLF-kuoron intensiteetin vaihtelu magneettisen pulsaation periodilla. VLF-aaltojen intensiteetti voi vaihdella lähes kaikilla magneettisten Pc-pulsaatioiden periodeilla. Pc 3-4-pulsaatiot voivat moduloida yleensä 0-3 kHz:n kuoro- ja suhinaemissioita. Myös näiden pulsaatioiden lähde on aurinkotuulessa.

Vähiten tutkittu, mutta ei kuitenkaan vähäisin, yhteys esiintyy VLF-aaltojen ja Pc 1-2-pulsaatioiden välillä. Vuorovaikutusta ei ole havaittu suoraan intensiteettimodulaationa, kuten Pc 3-4-aaltojen tapauksessa. Aaltojen yhteys huomattiin tutkittaessa korkeataajuisia (5-8 kHz) emissioita. Näistä ensimmäiset olivat vihellyksen liipaisemia kuoroja ja suhinoita. Yhden vuorokauden aikana niitä rekisteröitiin 259. Yhteyden selvittäminen on vielä kesken, mutta havaintojen perusteella voidaan korkeataajuisiin kuoroihin ja suhinoihin väittää aina liittyvän Pc 1-2-pulsaatioita. Kuitenkaan pulsaatioiden esiintyminen ei vielä takaa korkeataajuisten kuorojen ja suhinoiden esiintymistä. Teoreettisesti protonien (Pc 1-2-aaltojen lähde) ja VLF-aaltojen vuorovaikutus on osoitettu, mutta hyväkään teoria ei voi saada varauksetonta tukea, ellei sitä voida kokeellisesti todistaa.

Vaikka maanpinnalla havaittaisiinkin VLF-ilmiötä ilman magneettisia pulsaatioita, VLF-aaltojen taajuus- tai intensiteettimodulaatio voi kuitenkin aina olla seurausta hydromagneettisen aallon vaikutuksista VLF-aaltojen syntyalueen plasmaan. Tämän todistaminen vaatii kuitenkin alueellisesti kattavia satelliittimittauksia ja tilastollista tarkastelua.

Revontulipulsaatioihin liittyvien VLF-ilmiöiden rekisteröintejä ei ole esitetty tässä tutkielmanmassa, vaikka viimeaiset teoreettiset tutkimukset ovatkin osoittaneet yhteyden olevan ehkä entistäkin merkittävämpiä. DEMEKHOV and TRAKHTENGERTS (1994) ovat esittäneet revontulipulsaatioiden syntyn oman syklotronimaser-mallinsa, jolla heidän mielestään voidaan selittää läiskien "on"- ja "off"-ajat sekä pituus- ja leveyspiireistä riippuvat erot. Tähän liittyvän kokeellisen aineiston tutkimus voi jatkossa avata jopa uusia ulottuvuuksia revontulitutkimukseen.

Ihmisen energiankulutuksen aiheuttamat VLF-aallot ovat nousseet tärkeäksi tutkimuskohteeksi, varsinkin, kun koko ajan löytyy uusia VLF-ilmiöitä, joihin PLHR vaikuttaa. Voimalinjoista säteilee avaruuteen yliaaltoja (50 Hz:n harmoniset), jotka hetkittäin näyttävät olevan lähes hallitsevia VLF-alueen aaltoja ja siten osaltaan muokkaavat avaruuden hiukkaspopulaatioita. Suomen, Ruotsin ja Norjan pohjoisosat sekä Kuolan alue ovat eräitä niistä harvoista alueista, joilla energian kulutus on suuri juuri revontulialueen alapuolella. Myös sähkörautateiden ja teollisuuden aiheuttamat harmoniset yliväähelyt ovat merkittäviä "saastuttajia". Häiriöt ovat voimakkaimmillaan magneettisen aktiivisuuden muuttuessa. Kuitenkin PLHR:in aiheuttamien emissioiden käyttäytyminen on usein riippumatonta magneettisesta tilanteesta.

Lähes jokainen VLF-aaltojen tutkija on jossain vaiheessa törmänyt voimakkaaseen amplitudimoduloituun radiolähetykseen VLF-taajuusalueella. Tavallisesti ilmiö selitetään

laitehäiriön avulla, mutta siihen liittyy piirteitä, jotka eivät puolla laitevikaa. Yksi todennäköinen prosessi on radioaallon aiheuttamasta elektronilämpötilavaihtelusta ja ionosfäärin sähkövirroista johtuva demodulaatio D-ja E-kerroksissa. CANNON et al. (1982) on esittänyt neljä mallia, miten radiolähetyksessä voi vuorovaikuttaa revontulielektrojetin kanssa ja näin demoduloitua. Toistuvasti suomalaisissa mittauksissa on kuitenkin saatu viitteitä siitä, että täytyy olla vielä jokin muu tuntematon mekanismi, joka saa avaruuden toimimaan luonnollisena radiovastaanottimena.

Radiolähetykset ovat peräisin Venäjältä, Englannista, Saksasta, Norjasta, Ruotsista, Vatikaanista, Israelista ja Suomesta. Tyypillisesti radiolähetyksien kesto on korkeintaan muutamia minuutteja ja useimmissa tapauksissa ne liittyvät muuhun VLF-aktiviteettiin tai magneettisiin häiriöihin. Täydellistä korrelatiota esimerkiksi magneettisten pulsaatioiden kanssa ei ole havaittu. Se ei kuitenkaan poissulje mahdollisuutta, että demodulaatio olisi seurausta magneettisen pulsaation aiheuttamasta magneettikentän mikroskoopipisesta vaihtelusta. Radiolähetykset saattavat liittyä myös elektronin gyrotaajuuteen (f_H) ionosfäärissä sekä sen harmonisiin ($n f_H$).

Keinotekoiset signaalit voivat synnyttää myös liipaistuja emissioita. Tyypillisiä esimerkkejä ovat VLF-lähettimien ja voimalinjojen yliväärähtelyjen aiheuttamat emissiot.

Tässä tutkielman käsittelyt tapaukset ovat vain osa koko laajasta mittausaineistosta (noin 2000 tuntia). Lisäksi uusia ilmiöitä löytyy koko ajan lisää. Koska VLF-aaltojen tutkimus Suomessa on hyvin nuorta, ei kaikkia mahdollisia kytkentöjä magneettisiin ilmiöihin ole voitu löytää. Toisaalta, vaikka maailmalla VLF-tutkimusta on tehty ja tehdään laajalti, ei kovinkaan monessa tapauksessa ole etsitty kytkentöjä geofysiikan eri ilmiöiden välille. Teorioiden kehittyminen edellyttää kontrolloitujen kokeiden tekemistä. Tällöin kyseeseen tulevat heating-kokeet, joissa lähetetään voimakas radiosignaali ionosfäärin ja vastaanotetaan syntyviä VLF-aaltoja. Tutkimisen arvoista saattaisi olla myös emissioiden ionosfääristen kanavien karttoittaminen. Soveltavassa tutkimuksessa VLF-aaltoja voidaan käyttää esimerkiksi malminetsinnässä ja malmivarojen karttoituksessa.

Pohjoisen pallonpuoliskon VLF-mittaukset lepäävät tällä hetkellä pääasiassa suomalaisen ja venäläisten tutkijoiden varassa. Kuitenkin juuri pohjoisella pallonpuoliskolla ihmisen tuottaa eniten sähkömagneettista "saastetta". Tosin satelliittien käyttö mahdollistaa mittausten tekemisen kummallakin pallonpuoliskolla, mutta niiden havainnot ovat aina hetkellisiä. Tämän vuoksi myös maanpinnalla tehtäviä rekisteröintejä tulee jatkaa ja kehittää.

Kun vielä muutama vuosi sitten arvailtiin, onko ihminen jo vaikuttanut lähiavaruuden ilmiöihin, voidaan tänään sanoa vuorenvarmasti – kyllä! Aihe on niin akuutti, että jopa kansainvälinen radiotieteen unioni URSI päätti kokouksessaan Kiotossa 1993 ottaa aiheen yhdeksi painopistealueekseen. Joidenkin arvioiden mukaan kyseessä on jopa otsonikatoon verrattava ongelma.

LIITTEET

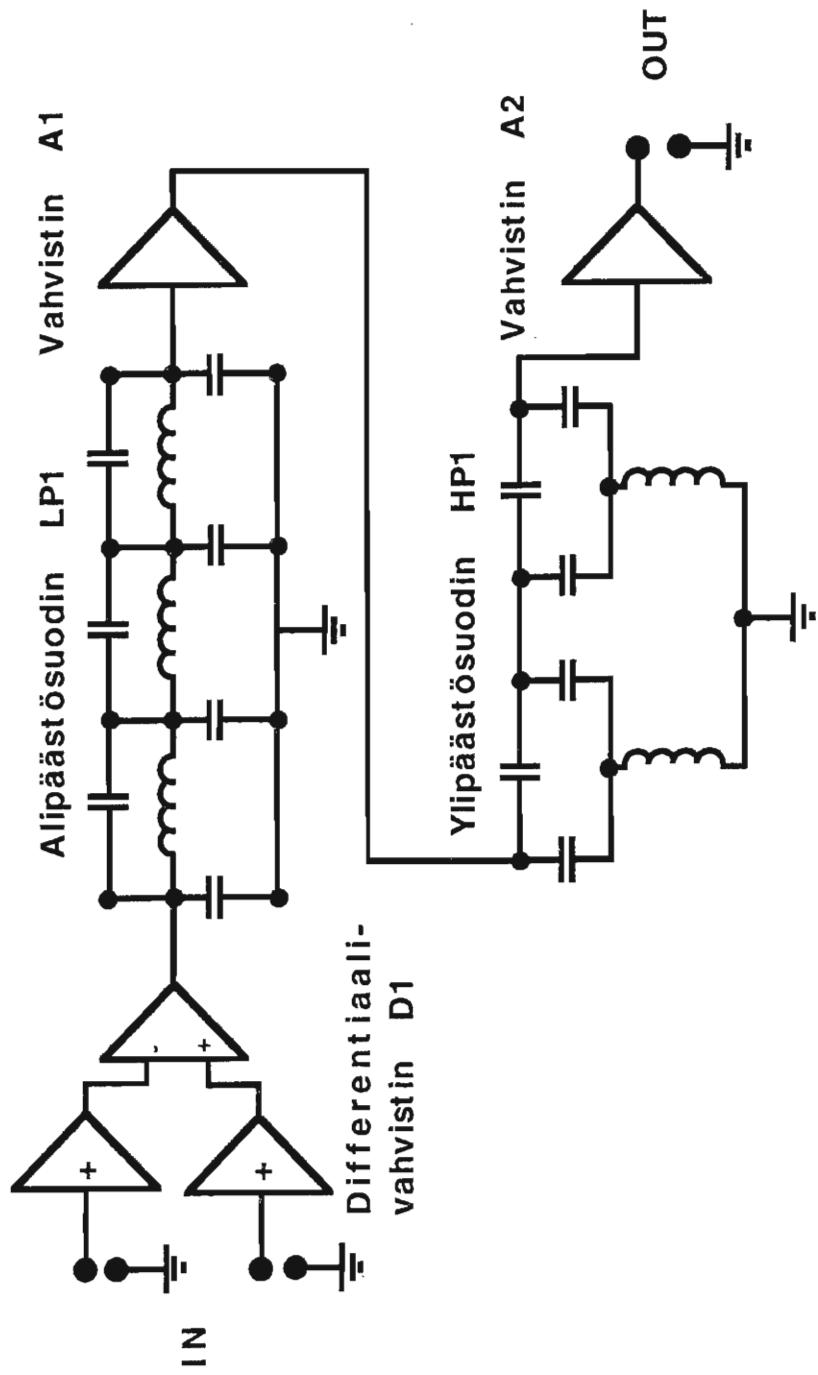
A Laitteiden kytkentäkaavioita

- A1** VLF-etuuvahvistimet
- A2** VLF-päävahvistin
- A3** Pulsaatiomagnetometri

B Julkaisujen käsikirjoitukset

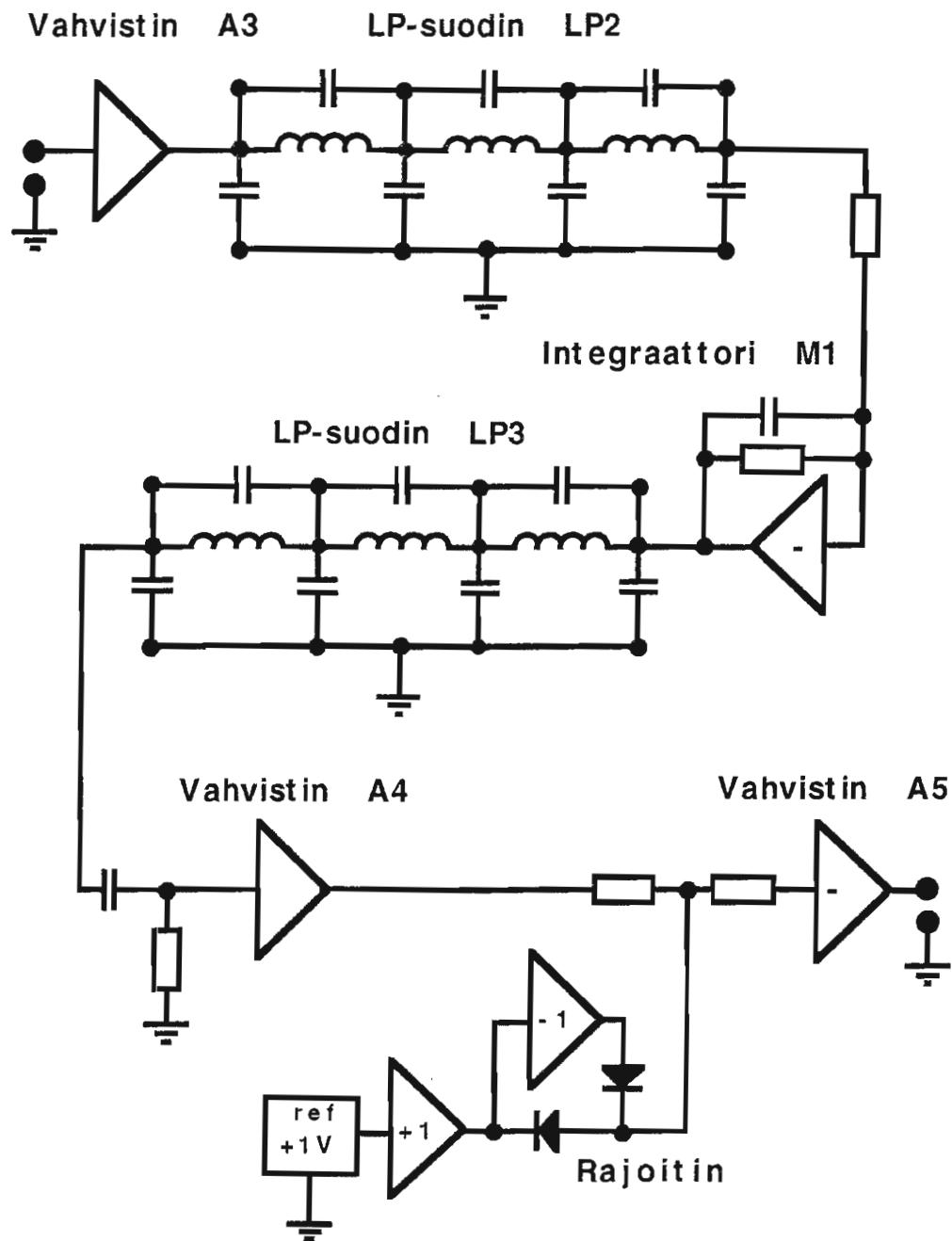
- B1** Yahnin A., E. Titova, A. Lubchich, T. Bösinger, J. Manninen, T. Turunen, T. Hansen, O. Troshichev and A. Kotikov (1995).
Dayside high latitude magnetic impulsive events: Their characteristics and relationship to Sudden impulses
J. Atmos. Terr. Phys. (in press).
- B2** Manninen J., T. Turunen, A. Lubchich, E. Titova and T. Yahnina (1995).
Relations of VLF emissions to impulsive electron precipitation measured by EISCAT radar in the morning sector of auroral oval
J. Atmos. Terr. Phys. (in press).
- B3** Manninen J., T. Turunen, J. Kultima and E. Titova (1994).
Correlating optical emissions, quasi-periodic VLF emissions and magnetic Pc3 pulsations.
Geomagnetism and Aeronomy (in press).
- B4** Manninen J. and T. Turunen (1993).
On the relative motions of whistler channels and auroral forms during an auroral substorm
Proceedings of The 19th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods at Kiruna August 9-14, 1992, edited by Åke Steen, 141-146.

A1 VLF-etuvahvistimet



Etuvahvistimen periaatteellinen kytkentä (suunnittelu ja toteutus T. Turunen). Laitetta on käsitelty yksityiskohtaisemmin tekstissä (kappale 2.1.1).

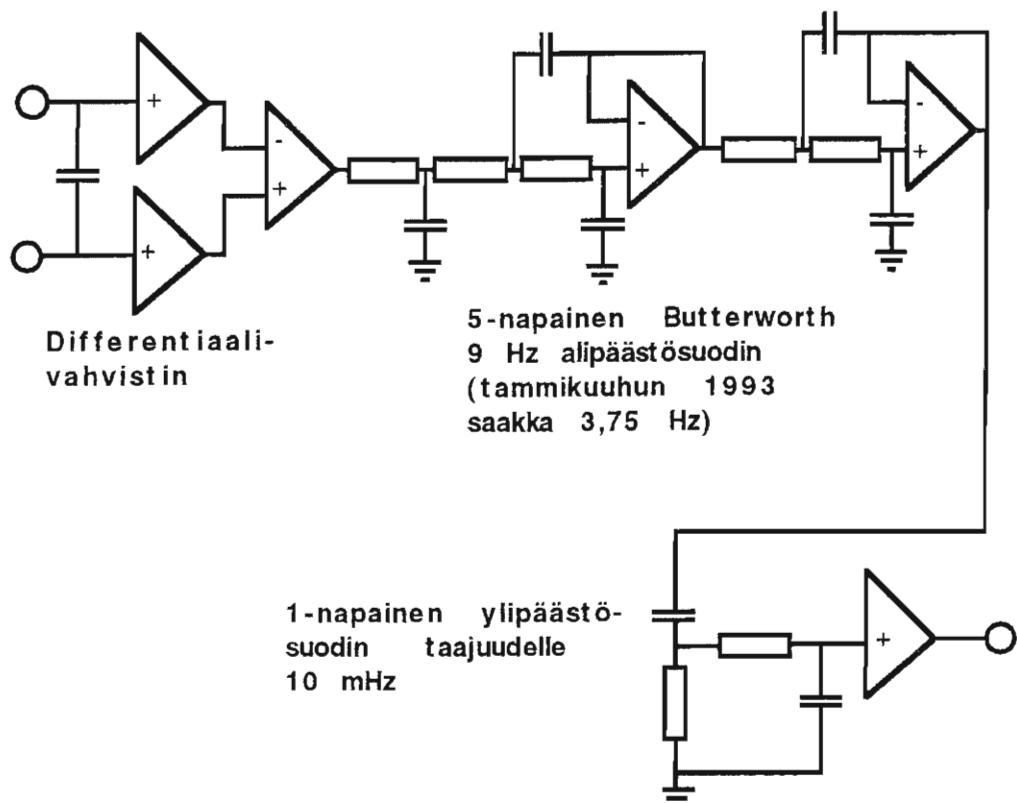
A2 VLF-päävahvistimet



Päävahvistimen periaatteellinen kytkentä (suunnittelu ja toteutus T. Turunen). Laitetta on käsitelty yksityiskohtaisemmin tekstissä (kappale 2.1.1).

A3 Pulsaatiomagnetometri

Pulsaatiomagnetometrin vahvistin
taajuusalueelle 10 mHz - 9 Hz
(yläraja tammikuuhun 1993
saakka 3,75 Hz)



Pulsaatiomagnetometrin periaatteellinen kytkentä (suunnittelu ja toteutus T. Turunen). Laitetta on käsitelty yksityiskohtaisemmin tekstissä (kappale 2.1.2).

Dayside high latitude magnetic impulsive events: Their characteristics and relationship to sudden impulses

A. YAHNIN,* E. TITOVA,* A. LUBCHICH,* T. BÖSINGER,† J. MANNINEN,† T. TURUNEN,‡ T. HANSEN,§ O. TROSHICHEV¶ and A. KOTIKOV¶

*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia; †Department of Physics, Univ. of Oulu, Finland; ‡Sodankylä Geophysical Observatory, Finland; §Auroral Observatory, Tromsø, Norway; ¶Arctic and Antarctic Research Institute, St.-Petersburg, Russia

Abstract—On 17 December 1990 a series of impulsive magnetic events (MIEs) were observed at high latitudes near local noon. EISCAT, situated some 5 hours of MLT away from the noon sector, detected simultaneous impulsive electron density enhancements at heights between 90 and 120 km. The MIEs at noon were also associated with riometer absorption spikes. The correlated EISCAT and riometer observations indicate that there was an elongated electron precipitation region some 3000 km wide stretching from local noon to morning. In close association with the impulsive electron precipitation, VLF emissions were observed by ground-based stations in the morning side. We interpret the large scale electron precipitation and VLF emissions as signatures of a global compression of the Earth's magnetosphere. This is confirmed by the specific type of magnetic variations simultaneously recorded at the world-wide network of magnetometers. We conclude that the small scale MIEs with their drifting ionospheric current vortex structures can (but do not necessarily have to) occur in conjunction with large scale SIs. Moreover, MIEs and SIs have a common origin: the interaction of solar wind inhomogeneities with the Earth's magnetosphere. They do, however, represent different effects of the same primary agent.

1. INTRODUCTION

Since the pioneering work of MATSUSHITA (1957), quite a number of studies have discussed transient magnetic impulses at the dayside high latitudes (see the review by GLASSMEIER (1992), where the phenomena are called magnetic impulsive events - MIE). These specific dayside magnetic disturbances have an intensity of several tens of nT and a duration of about 10 minutes. The interest in these phenomena was stirred up by the proposal (GOERTZ *et al.*, 1985; LANZEROTTI *et al.*, 1986) that the specific magnetic signatures seen on the dayside are related to impulsive magnetic reconnection, i.e. flux transfer events (FTE).

The current system of these transient disturbances was studied by FRIIS-CHRISTENSEN *et al.* (1988), GLASSMEIER *et al.* (1989). These authors used a meridional chain of stations to interpret the magnetic variations in terms of a vortex-like current system (often consisting of a clockwise and a counterclockwise vortex) which moves tailward from the noon sector. It is reasonable to connect these vortices in the ionospheric (Hall) current to a field-aligned current pair linking the ionosphere with some source in the outer magnetosphere or on the magnetopause.

Recently GLASSMEIER and HEPPNER (1992), VOROBIEV (1993), LÜHR and BLAWERT (1994) used a wide and dense network of magnetic sta-

tions at high latitudes to present a comprehensive case study of the afore mentioned current system. Among others VOROBIEV (1993) has shown that the twin-vortex current system responsible for the transient magnetic disturbance has a typical scale-size of 1000 km, that the leading vortex accelerates as it moves tailward, that the average velocity is about 3 km/s at the beginning of the disturbance near $MLT=9$, but about 6 km/s before its disappearance on the early morning side. These velocities are clearly greater than the velocity of ionospheric convection.

The relationship of MIEs and FTEs has not yet been conclusively demonstrated, moreover some authors claim that they are instead due to the penetration of solar wind inhomogeneities through the magnetopause (HEIKKILA *et al.*, 1989) or to processes developing in response to solar wind plasma pressure variations (see, for example, FRIIS-CHRISTENSEN *et al.*, 1988; FARRUGIA *et al.*, 1989 and the review by GLASSMEIER, 1992).

SIBECK (1990a) suggested a scenario of this kind in which dense solar wind plasma contacts the magnetopause, compresses the magnetosphere, and produces an anti-sunward moving inward bulge in the magnetopause. Field-aligned currents generated at the edges of the magnetopause bulge will produce the fast travelling Hall current vortices at the ionospheric level.

According to the model of SIBECK (1990a), the

MIEs should be accompanied by phenomena like those during SI and SC. Accordingly, one expects tailward propagating compressional waves which can produce precipitation of energetic particles and VLF waves during the MIEs. Some observations of compressional wave signatures during MIE-like events have been published (POTEMRA *et al.*, 1989; SIBECK *et al.*, 1989), but a relationship of MIEs to energetic particles precipitation and VLF waves has not been considered yet. The question whether or not MIEs are related to SIs or SCs remains open (see the discussion in LANZEROTTI *et al.*, 1991; GLASSMEIER, 1992 and in SIBECK, 1993).

In this paper we will present observations of MIEs made at 03-06 UT on December 17, 1990 and related ground-based observations of VLF waves and energetic electron precipitation. We use a world-wide magnetometer network for this study. The magnetic data will show that we are dealing with the same kind of disturbances seen in previous MIE studies and we will take up some specific aspects of such kind of disturbances. Energetic electron precipitation during these disturbances will be considered by using data from two riometer chains situated in the dayside and morning auroral zone. The coincidence of the event with a special Finnish EISCAT campaign provided us electron density data as well as VLF observations.

2. OBSERVATIONS AND GEOPHYSICAL SITUATION

Figure 1 presents a map of the stations from which data were used in this study (for coordinates see Table 1). Data from about 25 magnetometers situated along the auroral oval were available. The bulk of the information on magnetic field variations in the morning sector was obtained from the AARI stations situated in the Kara sea region, from the Norwegian network and the IMAGE chain of stations. The last two networks provided the data in digital form with 10 and 20 sec resolution (1 min data averages from the Norwegian network were used), the data from Siberian stations were digitized from the original paper chart records with 10 sec and 1 min resolution. From the AE-index stations, 1-minute average data were used. We also used magnetometer observations from the mid-latitudinal stations Irkutsk (dayside sector), Fresno (evening sector) and Fredericksburg (night sector).

Five stations of the Kara sea meridional chain were also equipped with 30 MHz riometers. Their data as well as the data of the Finnish riometer chain and the riometer located in Hornsund (Sval-

bard) were used to determine the region of enhanced energetic electron precipitation.

The VLF emission observations were made at two points: Lovozero (Kola peninsula) and Liikkuvankangas (near Sodankylä, Finland). In spite of some differences in the designs of the equipment, these two observation sites had similar characteristics and were able to record the emissions in the 0.3-10 kHz frequency range. The records were done on tape as well as on paper chart in several frequency bands. In the middle of the time interval considered (0430 UT), the AARI chain in the Kara sea was situated in the late morning sector (MLT = 10), the IMAGE network as well as most of stations of the Norwegian network were situated at MLT = 6 to 7.

All observations were made during a special campaign when the EISCAT facility operated in fast mode (measuring the ionospheric parameters along the magnetic field line with a time resolution of 0.2 s). Here we will use 1 s averages for electron density measurements.

General magnetic activity preceding and during the events under study is illustrated by the AE indices in Figure 2. After a period of magnetic calm a sequence of low intensity magnetic substorms started at 0210 UT.

Although not our subject we feel that it is wise to say a few words about the substorm development preceding our MIEs. This is because the substorm injected energetic electrons establish the pre-conditions for the ELF/VLF activity and electron precipitation in association with the MIEs and/or SIs. Investigation of individual auroral zone magnetograms provides evidence that the substorm developed in the night sector and occupied the region between PBQ and LRV stations (23-02 MLT). EISCAT was then situated at MLT = 4 and did not detect electron precipitation until 0234 UT, when signatures of precipitating 20-40 keV electrons were detected (i.e. an increase in the electron density at altitudes ~90-100 km).

After substorm onset, sporadic short-lived (some seconds) impulses of electron precipitation were the most remarkable feature in the precipitation (NYGRÉN *et al.*, 1992). At the same time, some increases in ELF chorus activity were detected by Lovozero and Liikkuvankangas stations in the 0.5-2 kHz frequency range. A combination of impulsive electron precipitation and ELF (VLF) chorus activity is typical for the morning sector (HOLZER *et al.*, 1974) and these phenomena are related to the development of the electron cyclotron instabil-

ity in the magnetosphere (KENNEL and PETSCHEK, 1966).

By 04 UT, the magnetic activity decreased in the auroral zone, as did the intensity of the high energy electron precipitation, and only rather soft particle precipitation was left over in the EISCAT area.

3. CURRENT SYSTEM RESPONSIBLE FOR MAGNETIC IMPULSES

Figure 3 presents a stack plot of magnetic recordings made at some AE index stations together with magnetograms obtained from the mid-latitude stations during the time interval from 03 to 06 UT. After 0410 UT, all auroral zone stations observed a sequence of short-lived disturbances with largest amplitudes on the dayside. The same figure shows that the dayside mid-latitude station Irkutsk exhibited multiple increases in the H component. These variations look like a series of SIs, the most abrupt SIs at 0412 and 0517 UT are marked in the figure by a vertical dashed line. Similar variations are seen in the magnetic recordings obtained from the mid-latitude stations in the evening and night sectors (FRN and FRD).

We use the dense network of magnetic stations operating in the morning sector for a detailed study of the current system. Unfortunately, there was no corresponding network in the evening sector. Figure 4 shows some examples of magnetograms recorded during the 03-06 UT interval in the morning sector. We will mainly pay attention to the analysis of the magnetic variations which started at around 0412 UT and 0517 UT because they were intense and relatively isolated with respect to their prehistory. There is similarity in the waveform of the variations recorded at the Kara sea compared to those seen at the Norwegian chain. To facilitate comparison, those parts of the traces which exhibit similar wave form were plotted bold. There is an obvious phase shift of 180° between northern and southern stations. The traces of one station (VIZ respectively UED) in between the phase shift exhibit mixed phase patterns. This is why they were not printed bold. The magnetic variations considered here look very similar to those considered by LANZEROTTI *et al.* (1986), FRIS-CHRISTENSEN *et al.* (1988), and others which dealt with transient magnetic impulses on the dayside. They have about 10 min duration and several tens of nT amplitudes.

The magnetic variations detected in the early morning sector (Kara sea) are delayed relative to

those seen in the dayside (Norwegian chain), which suggests that the disturbances propagate tailward from the pre-noon dayside region. This delay is best depicted by a comparison of the total horizontal components from three stations (UED, BJO, JAM) at the same latitude. This is shown in Figure 5. The 0417 UT maximum at UED moves to BJO in 7 minutes, and between BJO and JAM in 2 minutes. These three stations are located at the same latitude and separated by 3.12 and 1.88 hours of MLT, respectively. So the velocity of the longitudinal propagation of the disturbances between these two station pairs is (0.10 ± 0.01) deg/s and (0.26 ± 0.08) deg/s, respectively. For the spike which started at 0517 UT these values are (0.19 ± 0.04) deg/s and (0.31 ± 0.10) deg/s. The error estimates take into account the standard deviation of computations using either H, D, Z or $\sqrt{H^2 + D^2}$ components and the time resolution of the data.

Figures 6a and 6b show the equivalent current vectors obtained from different meridional chains of stations. To make this plot the magnetic data were filtered to remove variations with periods longer than 40 minutes. The current vectors were obtained by a 90° clockwise rotation of the horizontal magnetic disturbance vectors. They were plotted in a coordinate system where the X-axis is parallel to the invariant latitude and directed to the East, and the Y-axis is perpendicular to the invariant latitude and directed to the North. The vertical separation between the disturbance vectors in Figures 6a and 6b reflect the difference in invariant latitudes between the stations. The equivalent current vectors suggest a vortex-like pattern very similar to those considered by FRIS-CHRISTENSEN *et al.* (1988).

For instance, the disturbance which started at 0412 UT provides a good example of a westward-moving clockwise vortex. This vortex was centered between UED and VIZ along the Kara sea meridian and between TRO and BJO (closer to BJO according to the distribution of current vectors) along the Scandinavian meridian. To facilitate pattern recognition the current vortices have been schematically indicated in Figures 6a and 6b. It is important to realize that the vortex schematics are not meant to provide information on the actual scale size. The location of the center of the vortex as well as the propagation direction from day to night are confirmed by the current vector polarization properties. The polarization seen at a station depends namely on the direction of the

current system's propagation and the relative position of the station with respect to the current system center (see, for example, PASHIN *et al.*, 1982). Also ARAKI and ALLEN (1982) reported a reversal in the SI/SSC polarization with latitude. When the ground station lies poleward (southward) of a westward-propagating current vortex, the equivalent current vectors rotate clockwise (counterclockwise). Note that this is true regardless of whether the current in the actual current vortex flows clockwise or counterclockwise. The situation in Figure 6a shows that the equivalent current vectors at the equatorward stations (UED, IZV) or (SOR, TRO, MUO, PEL) rotate counterclockwise but the vectors at poleward stations (VIZ) or (BJO, HOP, NAL) rotate clockwise. The sense of rotation of the vectors is in Figure 6a schematically indicated in the leftside columns of arrowed circles. The equivalent current vortex may have formed sunward of the Kara sea chain. The onset of the disturbance occurred at 0412 UT when the first signatures of the disturbance were detected. Its center passed the Kara sea chain at 0417 UT, when the maximum total horizontal component was observed (cf. Figure 4). Applying the earlier derived velocity of westward propagation of 0.1 deg/s to the vortex we may conclude that the starting point of the vortex center was about 30° east from the longitude of the Kara sea chain.

A new isolated magnetic spike started on the dayside at 0516-0517 UT. At that time the Kara sea chain was situated at about 11 MLT. The distribution of the current vectors and their polarization (left and right columns) shown in Figure 6b allow us to conclude that a new westward moving clockwise current vortex was formed with its center almost over the Kara sea chain on a latitude between IZV and UED. At the same time the IMAGE and Norwegian networks show signatures of the same current vortex as developing eastward of the networks. Again, the delay of similar magnetic variations seen by western stations (cf. Figure 5) and the current vectors' polarization are in agreement with a westward propagation of the disturbance. In the morning sector (MLT = 8) the current vortex center was between BJO and HOP as inferred from the equivalent current vector's polarization (left column).

The isolated disturbance of 0517 UT had signatures of a twin-vortex current system as described by FRIIS-CHRISTENSEN *et al.* (1988). A counterclockwise current vortex was also observed by the Kara sea stations. This vortex passed the stations in the wake of the clockwise one, but its center

was located between UED and VIZ (cf. polarization patterns at right column). The appearance of the second vortex at higher latitudes may be indicative of a poleward movement of the whole current system (cf. the latitude of clockwise vortex at the Norwegian network).

Our data allow us to make an estimation of the characteristic times of growth and decay of the transient disturbances. Considering the event which started at 0517 UT (when the leading vortex appeared between the two meridional chains of magnetometers but close to the Kara sea), the maximal values of the disturbances were detected 2 to 3 minutes after the onset. It is clear that the life-time of the vortices is rather long (more than 10 minutes - see data presented in Figure 4, for example). If we suggest an exponential decay the decrement is about $(0.07 \pm 0.06) \text{ min}^{-1}$. This value was obtained by comparison of the horizontal variations with the same phase at the stations UED and JAM. The uncertainty is mainly in the determination of the amplitude (75%), not so much in the determination of the time delay (15%). Note that the amplitude of the horizontal component is larger in BJO than in UED (cf. Figure 5) which we interpret as an induction (coast) effect. In addition one has to be aware of the fact that the current system does not necessarily have the same distance to the stations during pass. This tells us that the amplitudes measured at different stations can be compared only with precautions. Nevertheless, for an order of magnitude estimate our data certainly suffice.

4. ENERGETIC ELECTRON PRECIPITATION AND VLF WAVES

With the exception of VIZ, all the ground riometers in the Kara sea chain observed absorption enhancements at the times of the magnetic impulsive events (Figure 7). The energetic electron precipitation spikes were limited to a zone ranging from 72° to 66° corrected latitude. There were, in fact, no absorption spikes in VIZ, and the data of low-latitude SOP showed (when data existed) that the absorption intensity decreased sharply in comparison with the data of DIX.

There were no significant absorption enhancements during the event in the Finnish riometer chain except at the highest latitude station Kevo (inv.lat. = 66.2°). Unfortunately, there are no riometer data available from the region between the Scandinavian coastline and Svalbard. The riometer situated in Hornsund (inv.lat. = 73°) did not

show any significant absorption variations either (not shown).

Another instrument which was able to detect the precipitation of energetic electrons was the EISCAT facility, so we can examine the variation of the electron density over Tromso and draw some conclusions about the characteristics of the precipitating particles.

Figure 7 shows the variation of the electron density at altitudes 90, 100, and 110 km. It can be seen that the electron density increased, especially at 90 km, at MLT = 6-7 in close relation with the riometer absorption spikes at the day time sector.

In several enhancements of the electron density during the time of interest, the electron density profiles revealed high energies for the precipitating electrons. Note that the spikes of the electron density at 90 km altitude (Figure 7) indicate the presence of a significant fraction of 40 keV electrons in the precipitating electron population.

Thus, Figure 7 provides evidence for the existence of an extended (from almost noon to morning) band of impulsive energetic electron precipitation. Also, pulses of VLF emission intensity at 1.6 kHz at Lovozero corresponded to the sequence of absorption and magnetic impulses on the dayside, as shown in Figure 7. Several recent studies confirm a connection of VLF emission enhancements with the precipitating energetic electrons at high latitudes during SI and SC events (SAITO *et al.*, 1974; GAIL *et al.*, 1990) and with periodic solar wind pressure variations (SIBECK *et al.*, 1989).

5. DISCUSSION

5.1. Summary of current vortex properties

Let us briefly summarize and complete the list of characteristics for the magnetic disturbances observed in high latitudes.

The current system responsible for the dayside magnetic transient events was vortex-like at the ionospheric level. The current system propagated tailward and the speed was 0.10-0.19 deg/s (3.7-7.2 km/s) on the dayside and about 0.26 deg/s (9.5 km/s) in the morning side. A previous statistical survey, with only a few examples, indicated that events might accelerate as they move antisunward (SIBECK, 1990b). Our case study provides a clear demonstration (see also VOROBIEV, 1993) that this is indeed the case. The size of the current system (distance between centers of vortices) for the 0517 UT event can be estimated from Figure 6b by taking into account the propagation velocity. It yields 2 hours of MLT or about 1500

km. All these properties are in good agreement with those found in previous studies (see FRIS-CHRISTENSEN *et al.*, 1988; GLASSMEIER and HEP-PNER, 1992; GLASSMEIER *et al.*, 1989; VOROBIEV, 1993).

It is also possible to estimate the location from where the disturbance started. As it was noted earlier the center of the leading vortex of the event at 0517 UT was situated over the Kara sea chain at 11 MLT. Taking into account the propagation velocity and the time of passage of the leading vortex over the Kara sea chain we have also estimated the location of generation for the vortex of the event at 0412 UT. The result is that the region from where the vortex possibly started its movement was in the 11 MLT sector.

As we noted before we could not examine the development of the current system in the evening auroral zone in the same way as in the morning sector due to gaps in the distribution of stations. Nevertheless it is clear from the magnetograms presented in Figure 3 that the properties of magnetic disturbances in the evening auroral zone are very different. In the evening sector the magnetic data do not show any oscillations which could be interpreted as due to propagation of current vortices.

There is some discrepancy in the literature concerning such 'asymmetrical' pattern of the current system. Some signatures of such currents were reported to appear symmetrically around noon as described by HEIKKILA *et al.* (1989). LANZEROTTI *et al.* (1991) found two maxima in the occurrence rate of transient magnetic impulses, one (larger) in the morning and one (smaller) in the afternoon sector. Other statistical studies (GLASSMEIER *et al.*, 1989; VOROBIEV *et al.*, 1993) reported only a morning maximum. The data presented here provide a good example of a situation in which such an asymmetry clearly exists.

5.2. Triggering of the current system of MIEs by variations in the solar wind pressure

First of all it is important to note that the signatures of the vortex-like current systems occurred in close association with SI-like magnetic variations seen in the mid-latitudinal stations on the day, evening, and night side. The similarity with SIs is also indicated by the global character of the magnetic disturbance seen in the auroral zone at all MLTs (see Figure 3). As described above, the appearance of every vortex-like current system on the dayside was accompanied by an enhancement of

the precipitation of energetic electrons. The precipitations were detected nearly simultaneously at longitudes separated by up to 4 hours of MLT. This indicates that the precipitation is not related with some local mechanism developing in the region of the vortex-like current source but rather that it was global. Association of this precipitation with VLF waves in the 1.2-2.5 kHz frequency range (also observed far from noon) suggests that 10-40 keV electrons were precipitated by the electron cyclotron instability developing in the equatorial plane. This mechanism was studied in the literature in detail and it is believed to be responsible for the precipitation of the energetic electrons observed during SIs or SSCs.

This does not mean that every SI and SSC is accompanied by the generation of VLF waves and the precipitation of electrons (SAITO *et al.*, 1974). The cyclotron instability growth rate must first exceed some threshold value (KENNEL and PETSCHER, 1966). This value is more likely to be exceeded when a high flux of energetic electrons exists in the magnetosphere. The best conditions for the generation of VLF waves and related electron precipitation during a magnetosphere compression are, therefore, expected after substorm (SAITO *et al.*, 1974). In our case we were fortunate to meet such a situation.

In addition to the ground-based observations good evidence for a distinct relationship between our MIEs and solar wind inhomogeneities (data not shown) is provided by solar wind observations (IMP-8) and by observations at geosynchronous orbit (GOES-6). The IMP-8 satellite moved in the solar wind from GSE $(x,y,z) = (-1.21, -31.03, 16.98)$ RE at 03.00 UT to $(0.90, -31.31, 16.98)$ RE at 06.00 UT. The satellite observed prior to the time of our MIEs a steady magnetic field strength and direction (the IMF was generally ecliptic or slightly northward during the whole interval under study). Between 04 and 05 UT the satellite registered a sequence of sharp decreases in the magnetic field strength from ~ 6 nT to ~ 2 nT. The sequence started at 0422 UT. In this series also the last decrease at 0524 UT was sharp and isolated. The solar wind plasma data show impulsive increases in the dynamic pressure from ~ 3 nPa to ~ 6 nPa correlating strictly with the IMF strength decreases.

The GOES-6 satellite (which was situated in the evening magnetosphere at 16 and 19 MLT at 03 and 06 UT, respectively) measured several enhancements in the northward directed magnetic field strength. The first enhancement started at

0411-0412 UT and consisted of an impulsive increase from 79.1 nT to 84.6 nT correlating well with our MIE event. An enhancement at 0517 UT was also clearly seen and the increase reached 78.6 nT from 72.6 nT.

The ionospheric events began somewhat earlier than the features were seen at IMP-8. There seems to be no problem in relating the lags of the solar wind features to the ionospheric events. Due to the IMP-8's location outside the dawn bow shock, and the spiral IMF orientation (IMF longitude = 320°), solar wind features first struck the dayside magnetosphere and later reached IMP-8. Thus solar wind features at 0422 UT were related to the ionospheric event at 0412/0415 UT, and solar wind features at 0524 UT were related to the ionospheric event at 0517 UT.

From all these facts we conclude that the generation of the vortex-like currents in the noon high latitude ionosphere occurred simultaneously with the appearance of sudden impulses (SIs) which were due to solar wind pressure variations. There are some discrepancies between our observations and theoretical predictions. In our case the leading current vortices of the MIEs were clockwise. Theory predicts that SIs related vortices should be counterclockwise (GLASSMEIER, 1992). We cannot, however, assume a decompression of the magnetosphere. The observed SI-like variations in the H-component of the mid-latitude magnetic field were positive and other observations confirm a magnetospheric compression as well.

5.3. Equatorial magnetosphere region conjugacy with the ionospheric current vortices

Figure 8 presents the projection of the stations of the Kara sea and the Norwegian meridional chains into the equatorial plane of the magnetosphere according to TSYGANENKO (1989) model for $K_p=3$. We used this 'middle' model version because it is difficult to be sure what version of the model is appropriate for a given time taking into account only the magnetic activity level. But a comparison of different versions of the model show that there is good qualitative agreement in the results of field line projection. The centers of the ionospheric current vortices project into closed field line regions. Only in a very disturbed ($K_p=6$) version does the field line of station VIZ open and project into the magnetospheric lobe. Following this mapping, we estimate the following values:

- velocity of the current source is along the magnetopause about 110-170 km/s (dayside) and 215 km/s (morning side);

- size of the current source is about $4 R_E$.

The estimated velocity in the magnetosphere is comparable with values given by SIBECK (1992) on the basis of two satellite measurements (210 km/s). SIBECK (1992) interpreted his event as the antisunward propagation of a compression on the magnetopause surface at a velocity similar to that in the magnetosheath (150-250 km/s). It is interesting to note that the solar wind velocity measured in the study of Sibeck was about 450 km/s and in our case about 400 km/s.

Our data show that in the day time sector, the centers of the vortices lie near the poleward boundary of the belt of impulsively precipitating energetic electrons. We suggest that the precipitation originates from the radiation belt's outer edge which is colocated with the dayside magnetopause. The inner edge of the low latitude boundary layer (LLBL) lies nearby. McHENRY *et al.* (1988) reported that the centers of the dayside current vortices were observed at the inner edge of LLBL precipitation. VOROBIEV (1993) reached the same conclusion and showed that the current vortex signatures collocate with the equatorial part of the region of low energy precipitation which is known to be related to 'red' auroral emissions. In agreement with our energetic electron precipitation data, increases in the 'green' emission at latitude equatorward from the current vortex centers were found during some transient magnetic events (VOROBIEV, private communication, 1993).

6. SUMMARY AND CONCLUSION

We dealt with dayside high latitude magnetic impulsive events using a collection of ground-based data which included observations of middle and high latitude magnetic variations, riometer absorption, and the EISCAT electron density. It was shown that:

- at the ionospheric level in the morning sector, the current system associated with transient magnetic impulses consists of vortex-like currents (one isolated pulse has a double vortex);

- the vortex-like current systems are generated near noon.

- the leading vortex is clockwise;
- the distance between vortices is about 1500 km on the dayside;

- the vortices accelerate tailward approximately along the corrected latitude with an average velocity of 0.1-0.2 deg/s; the time scale of the amplitude decay is of the order of 15 min;

Most of our findings confirm the results of previous works (FRIIS-CHRISTENSEN *et al.*, 1988; GLASSMEIER *et al.*, 1989) and provide additional evidence for the existence and the properties of the current system developing in the dayside. Beside their magnetic properties we discussed related phenomena:

- pulses of energetic electron precipitation corresponding to the vortices were detected on the day and in the morning sides (as far as 4-6 hours of MLT away from noon where the currents were generated); at inv.lat. between 68° and 72° ;

- corresponding VLF emission enhancements were detected in the morningside.

These results, along with the data of magnetic observations in the auroral zone and at mid-latitudes, strongly confirm the relationship of the currents appearing near noon with sudden impulses which are usually (and, very likely, in our case) connected with solar wind inhomogeneities.

A large class of geomagnetic variations is connected with SIs and SCs including a damped long-period pulsation type (WILSON and SIGIURA, 1963; HIROSAWA, 1970; TVERSKAYA and KHOROSHEVA, 1982; POTEMRA *et al.*, 1989). These pulsations (Psi5) have a maximum amplitude at high latitudes and exhibit a dayside-morning maximum in their diurnal occurrence (see review by SAITO, 1978, for example). One can think of the MIEs as such damped-type SI triggered pulsations, but with an extremely long period, which have little in common with the classic Pc5s. The current system and the propagation characteristics of Psi5 have not yet been studied so we cannot compare in much detail the characteristics of Psi5s with MIEs. It is, however, very likely that the MIEs can be considered as a subtype of Psi5 pulsations.

We would like to note that the localized current system of the MIEs certainly differed from that expected (see, for example, ARAKI, 1987; REZHENOV and LYTSKIY, 1987) and observed for SI (ARAKI and NAGANO, 1988). SI and SC are connected with the tailward propagation of a hydromagnetic magnetosonic wave through the magnetosphere from the dayside magnetopause, and one expects a delay of about 1 minute in the appearance of the signatures of the magnetic disturbance on the day with respect to the ones at the night sides. MIEs definitely propagate tailward more slowly, so one has to suggest another mechanism of propagation. It

could be a mechanism similar to that suggested by SIBECK (1990a) or a surface wave moving antisunward along the inner boundary of the LLBL. The question whether SI and MIE signatures are to be observed together or not is, in our opinion, a question of the amplitude of the magnetopause disturbance and the conditions in the magnetosphere. Small scale (in comparison with the diameter of magnetosphere) solar wind inhomogeneities cannot produce global effects because of the small amplitude of the corresponding magnetosonic waves. Even the effects of a large scale solar wind inhomogeneities will not be detected globally at high latitudes if there are not enough particles in the magnetosphere to produce precipitation and enhance the ionospheric conductivity sufficiently. Consequently, despite the common cause of SIs and MIEs, one observes sometimes MIEs without global SI signatures and sometimes with them.

Acknowledgements—We are indebted to the director and staff of EISCAT for operating the facility and greatly acknowledge the support by civilians and personnel of institutions who contributed to the Finnish SP-Auroral EISCAT experiment in December 1990. We

mention here only - pars pro toto - the Polar Geophysical Institute in Apatity/Russia, the Geophysical Observatory in Sodankylä/Finland and the Finnish Meteorological Institute in Helsinki/Finland and especially Mr Timo Turunen and Mr. Paavo Törmänen.

EISCAT is an international association supported by the research councils of the Academy of Finland (SA), Centre National de la Recherche Scientifique of France (CNRS), Max-Planck Gesellschaft of Germany (MPI), Norges Almenitenskapelige Forskningsråd of Norway (NAV), Naturvetenskapliga Forskningsrådet of Sweden (NFR) and the Science and Engineering Research Council of the United Kingdom (SERC).

We thank Mrs. Ritva Kuula of the Department of Physics for computational assistance and Mr. Lasse Häkkinen of the Finnish Meteorological Institute for the provision of the IMAGE data.

The authors thank L.D.Morris (WDC A for STP), G.Jansen van Beek (Geological Survey of Canada), E.Friis-Christensen (Danish Meteorological Institute), I. Högström (Swedish Institute of Space Physics) who provided us the magnetometer data for Fig. 3 and for the calculation of the preliminary AE index. We are grateful to D.Sibeck, K.Mursula and V.Sergeev for their assistance in receiving the satellite data.

The work of six of the authors (A.Y., E.T., A.L., T.B., J.M. and T.T.) was supported by the Finnish-Russian Commission on Cooperation in Science and Technology.

REFERENCES

- ARAKI, T.
- ARAKI, T. and ALLEN, J.
- ARAKI, T. and NAGANO, H.
- FARRUGIA, C., FREEMAN, M., COWLEY, S., SOUTHWOOD, D., LOCKWOOD, M. and ETEMADI, A.
- FRIIS-CHRISTENSEN, E., MCHENRY, M., CLAUER, C. and VENNERSTROM, S.
- GAIL, W., INAN, U., HELLIWELL, R., CARPENTER, D., KRISHNASWAMY, S., ROSENBERG, T. and LANZEROTTI, L.
- GLASSMEIER, K.-H.
- GLASSMEIER, K.-H. and HEPPNER, C.
- GLASSMEIER, K.-H., HONICH, M. and UNTIEDT, J.
- 1987 A model of geomagnetic sudden commencement. In: *Quantitative modeling of magnetosphere-ionosphere coupling processes*, (Eds. by Y. Kamide and R.A. Wolf). Kyoto Sangyo university, Kyoto, Japan, 47–52.
- 1982 Latitudinal reversal of polarization of the geomagnetic sudden commencement. *J. geophys. Res.* **87**, 5207–5216.
- 1988 Geomagnetic response to sudden expansion of the magnetosphere. *J. geophys. Res.* **93**, 3983–3988.
- 1989 Pressure-driven magnetopause motions and attendant response on the ground. *Planet. Space Sci.* **37**, 589–608.
- 1988 Ionospheric traveling convection vortices observed near the polar cleft: A triggered response to sudden changes in the solar wind. *Geophys. Res. Lett.* **15**, 253–256.
- 1990 Characteristics of wave-particle interaction during sudden commencements. 1. Ground-based observations. *J. geophys. Res.* **95**, 119–137.
- 1992 Travelling magnetospheric convection twin-vortices: Observations and theory. *Ann. Geophys.* **10**, 547–565.
- 1992 Travelling magnetospheric twin-vortices: Another case study, global characteristics and a model. *J. geophys. Res.* **97**, 3977–3992.
- 1989 Ground-based and satellite observations of travelling magnetospheric convection twin-vortices. *J. geophys. Res.* **94**, 2520–2528.

GOERTZ, C., NIELSEN, E., KORTH, A., GLASSMEIER, K.-H., HALDOUPIS, C., HOEG, P. and HAYWARD, D.	1985	Observations of a possible ground signature of flux transfer events. <i>J. geophys. Res.</i> 90 , 4069–4078.
HEIKKILA, W., JØRGENSEN, T., LANZEROTTI, L. and MACLENNAN, C.	1989	A transient auroral event on the dayside. <i>J. geophys. Res.</i> 94 , 15291–15305.
HIROSAWA, T.	1970	Long-period geomagnetic pulsation (pc5) with typical sinusoidal waveform. <i>Rep. Ionos. Space Res. Japan</i> 24 , 66–79.
HOLZER, R., FARLEY, T. and BURTON, R.	1974	A correlated study of ELF-waves and electron precipitation on OGO-6. <i>J. geophys. Res.</i> 79 , 1007–1013.
KENNEL, C. and PETSCHEK, H.	1966	Limit of stably trapped particle fluxes. <i>J. geophys. Res.</i> 71 , 1–28.
LANZEROTTI, L., LEE, L., MACLENNAN, C., WOLFE, A. and MEDFORD, L.	1986	Possible evidence of flux transfer events in the polar ionosphere. <i>Geophys. Res. Lett.</i> 13 , 1089–1092.
LANZEROTTI, L., KONIK, R., WOLFE, A., VENKATESAN, D. and MACLENNAN, C.	1991	Cusp latitude magnetic impulse events. Occurrence statistics. <i>J. geophys. Res.</i> 96 , 14009–14022.
LÜHR, H. and BLAWERT, W.	1994	Ground signatures of travelling convection vortices. In: <i>American Geophysical Union Geophysical Monograph 81</i> , (eds. M.J. Engebretson, K. Takahashi and M. Scholer), Washington, 270–278.
MATSUSHITA, S.	1990	On sudden commencements of magnetic storms at higher latitudes. <i>J. geophys. Res.</i> 62 , 162–166.
MCHENRY, M., CLAUER, C., FRIIS-CHRISTENSEN, E. and KELLY, J.	1988	Observation of ionospheric convection vortices: Signatures of momentum transfer. <i>Adv. Space Res.</i> 8 , 315–320.
NYGRÉN, T., KAILA, K., HUUSKONEN, A. and TURUNEN, T.	1992	Determination of E region effective recombination coefficient using impulsive precipitation events. <i>Geophys. Res. Lett.</i> 19 , 445–448.
PASHIN, A., GLASSMEIER, K.-H., BAUMJOHANN, W., RASPOPOV, O., YAHNIN, A., OPGENOORTH, H. and PELLINEN, R.	1982	Pi2 magnetic pulsations, auroral break-ups, and the substorm current wedge: A case study. <i>J. Geophys.</i> 51 , 223–233.
POTEMRA, T., LÜHR, H., ZANETTI, L., TAKAHASHI, K., ERLANDSON, R., MARKLUND, G., BLOCK, L., BLOMBERG, L. and LEPPING, P.	1989	Multi-satellite and ground-based observations of transient ULF waves. <i>J. geophys. Res.</i> 94 , 2543–2554.
REZHENOV, B. and LYTSKIY, W.	1987	Current system of sudden impulse (SI). <i>Geomag. Aeron., Engl. Transl.</i> 27 , 207–210.
SAITO, T.	1978	Long-period irregular magnetic pulsation, Pi3. <i>Space Sci. Rev.</i> 21 , 427–467.
SAITO, T., TAKAHASHI, F., MORIOKA, A. and KUWASHIMA, M.	1974	Fluctuation of electron precipitation to the day-side auroral zone modulated by compression and expansion of the magnetosphere. <i>Planet. Space Sci.</i> 22 , 939–953.
SIBECK, D.	1990a	A model for transient magnetospheric response to sudden solar wind dynamic pressure variations. <i>J. geophys. Res.</i> 95 , 3755–3771.
SIBECK, D.	1990b	Quantifying the magnetospheric response to solar wind dynamic pressure variations. In: <i>Physics of Space Plasmas</i> , (eds. T. Chang, G.B. Crew and J.R. Jasperse), Scientific Publishers, Cambridge, MA, 379–396.
SIBECK, D.	1992	Transient events in the magnetosphere: Boundary waves or flux transfer events? <i>J. geophys. Res.</i> 97 , 4009–4026.
SIBECK, D.	1993	Transient magnetic field signatures at high latitudes. <i>J. geophys. Res.</i> 98 , 243–256.

Short title	10
-------------	----

- SIBECK, D., BAUMJOHANN, W., ELPHIC, R., FAIRFIELD, D., FENNEL, J., GAIL, W., LANZEROTTI, L., LOPEZ, R., LÜHR, H., LUI, A., MACLENNAN, C., MCENTIRE, R., POTEMRA, T., ROSENBERG, T. and TAKAHASHI, K.
- TSYGANENKO, N.
- TVERSKAYA, L. and KHOROSHEVA, O.
- VOROB'YEV, V.
- VOROB'YEV, V., ZVEREV, V. and STARKOV, G.
- WILSON, C. and SIGIURA, M.
- 1989 The magnetospheric response to 8-minute period strong-amplitude upstream pressure variations. *J. geophys. Res.* **94**, 2505–2519.
- 1989 A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planet. Space Sci.* **37**, 5–20.
- 1982 Source of the packages of damped long-period geomagnetic pulsations. *Geomag. Aeron.*, Engl. Transl. **22**, 676–680.
- 1993 Dynamics of the hall current vortices on the day-side high latitudes. *Geomag. Aeron.* **33**, 58–68 (in Russian).
- 1993 Geomagnetic impulses in the high latitude dayside region: main morphological characteristics and relation to the dayside aurora dynamics. *Geomag. Aeron.* **33**, 69–79 (in Russian).
- 1963 Hydromagnetic interpretation of sudden commencements of magnetic storms. *J. geophys. Res.* **68**, 3314–3320.

Figure 1. Map of used observation sites in geomagnetic coordinates which have been calculated by Tsyganenko's T89 model (cf. Table 1). See text for details.

Figure 2. The preliminary AE index for 17 December, 1990.

Figure 3. Magnetograms from auroral zone (top) and mid-latitude (bottom) stations. The onsets of the two most abrupt and best isolated SIs are indicated by a vertical dashed line throughout all figures up to Figure 7. For details see text.

Figure 4. The H-component disturbance field registered at the Kara-sea chain (right) and at the Norwegian chain (left). Similar waveforms in association with the SIs in question are printed bold to ease comparison between registrations made to the east (Kara-sea) and to the west (Norwegian). For details see text.

Figure 5. The total horizontal disturbance field registered at stations in the morning sector UED, BJO, JAM; top: for the time interval 0400-0440 UT, bottom: for the time interval 0500-0540 UT. The maxima of amplitudes used for the determination of the time delays are marked by hatching. For details see text.

Figure 6. a) The equivalent current vectors registered at the meridian of the Kara-sea (right) and at the meridian of Norway (left) for the time interval 0410-0430 UT. The sense of polarization and the current vortex are schematically indicated. The symbols are self-explaining. For details see text. b) The same as Figure 6a but for the later time interval 0500-0540 UT. Note that this time a double vortex structure of a clockwise and a counterclockwise current loop can be identified. For details see text.

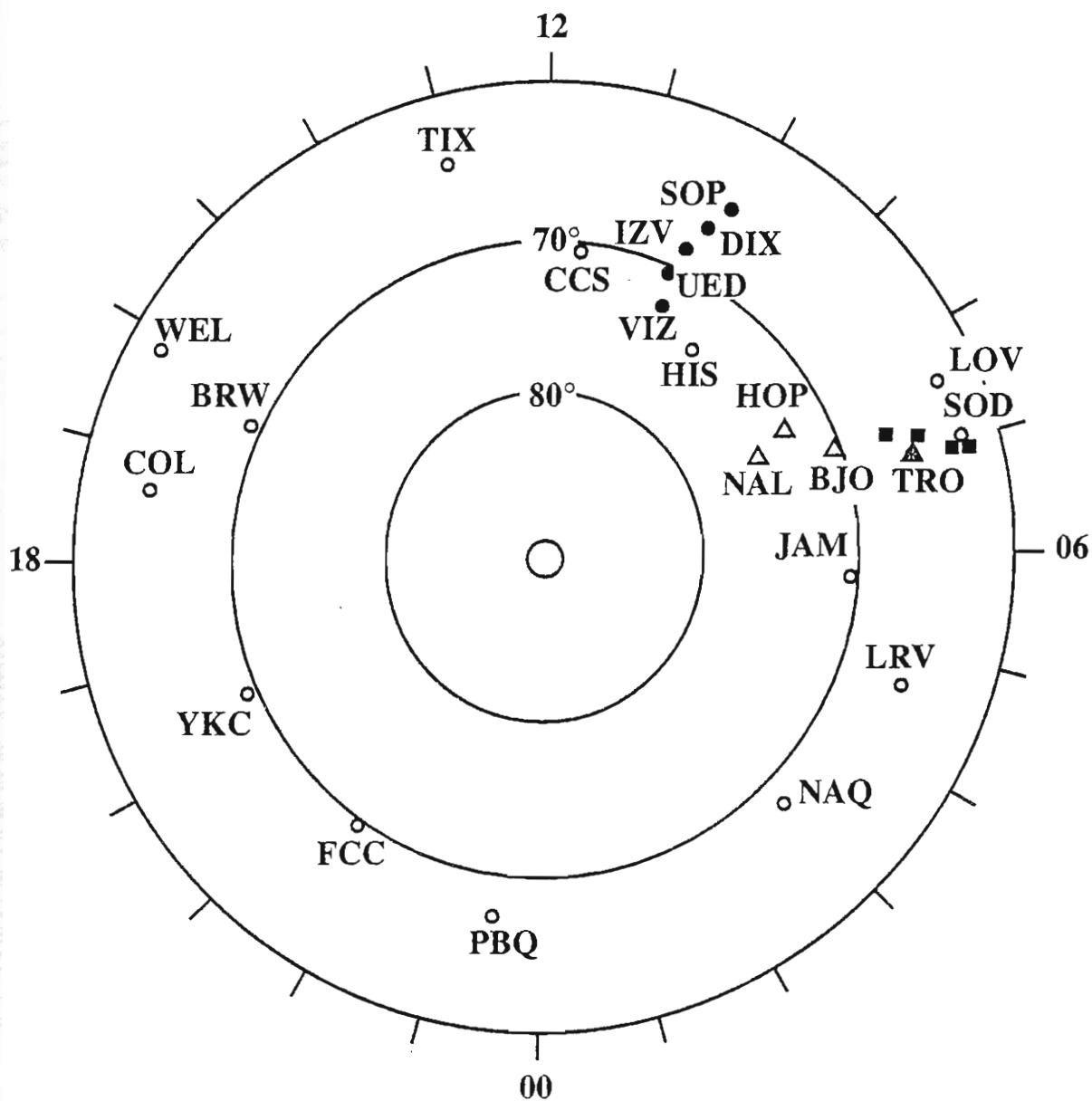
Figure 7. Correlated data of different kinds of observations in the morning sector. From top to bottom: the VLF wave recordings in Lovozero at the frequency 1.6 kHz; the riometer recordings at the Kara sea stations UED, IZV, DIX, SOP; the electron density measured in the EISCAT experiment at altitudes 90, 100, 110 km. Note that the impulsive events under consideration (indicated by hatching) are only the first and the last out of a series of impulsive events. For details see text.

Figure 8. Projection of the Kara sea (circles) and Norwegian (stars) magnetometer sites into the magnetospheric equatorial plane. The magnetopause is schematically indicated.

List of stations

Name	Code	Geogr. coord.	Geom. coord.*	
Cape Chelyuskin	CCS	77.72	104.28	71.62 173.23
	VIZ	79.48	76.98	73.52 157.75
	UED	77.52	82.22	71.74 159.89
	IZV	75.87	83.08	70.26 160.08
	DIX	73.54	80.56	68.21 157.85
Sopodinaya	SOP	71.87	82.70	66.65 159.01
	HIS	80.62	58.05	75.05 148.46
	HOP	76.51	25.01	72.20 122.83
	NAL	78.92	11.93	76.32 119.38
	BJO	74.52	19.02	71.88 115.23
Tromsø	TRO	69.66	18.95	67.44 109.38
	SOD	67.37	26.63	64.71 113.81
	LII	67.51	26.33	64.83 113.67
	LOV	67.97	35.02	64.72 121.23
	SOR	70.54	22.22	67.99 112.94
Alta	ALT	69.90	22.96	67.35 112.92
	MUO	68.00	23.53	65.53 111.71
	PEL	66.90	24.08	64.46 111.23
	JAM	70.90	351.30	71.44 87.22
	LRV	64.18	338.30	66.84 66.74
Nassarssuaq	NAQ	61.10	314.80	67.60 38.68
	PBQ	55.30	282.25	66.44 355.15
	FCC	58.77	265.90	69.50 333.45
	YKC	62.43	245.50	70.16 305.04
	COL	64.87	212.17	66.23 264.24
Barrow	BRW	71.30	203.25	70.86 247.96
	WEL	66.17	190.17	64.07 242.09
	TIX	71.58	129.00	65.83 191.46
	FRD	38.21	282.63	49.81 353.98
	IRT	52.17	104.45	47.11 175.08
Fresno	FRN	37.09	240.28	44.05 309.48

*According to Tsyganenko TS89 model



- The Kara sea chain of stations
- △ The Norwegian network
- The IMAGE network
- Global network
- * EISCAT

Fig. 1

17 DECEMBER 1990

AE (15)

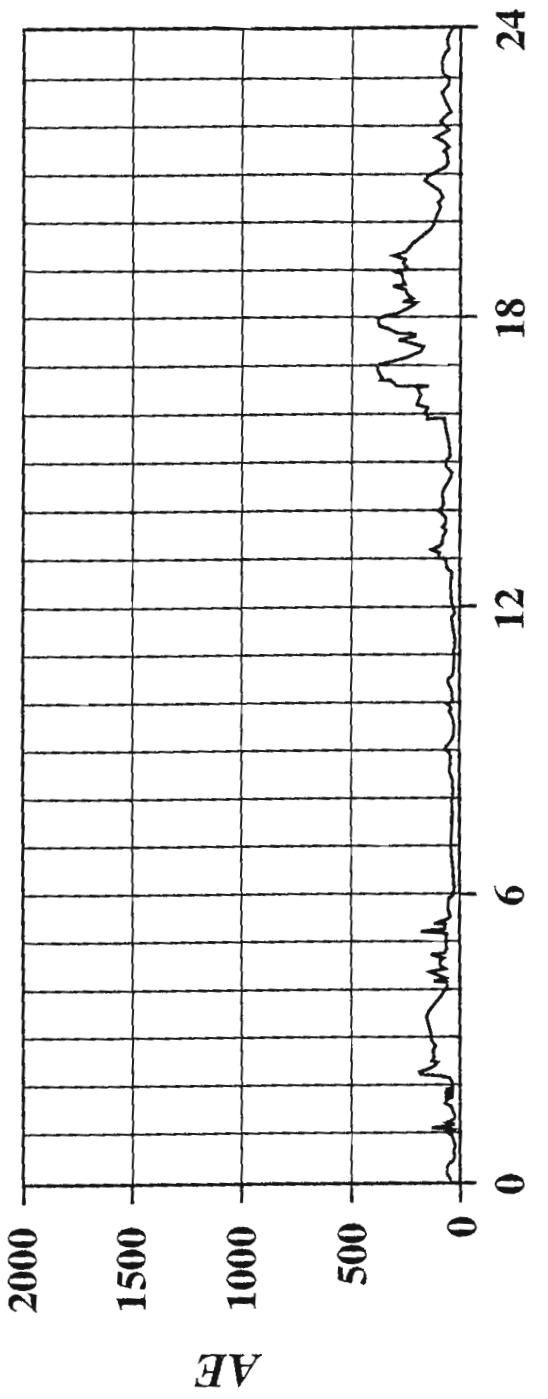
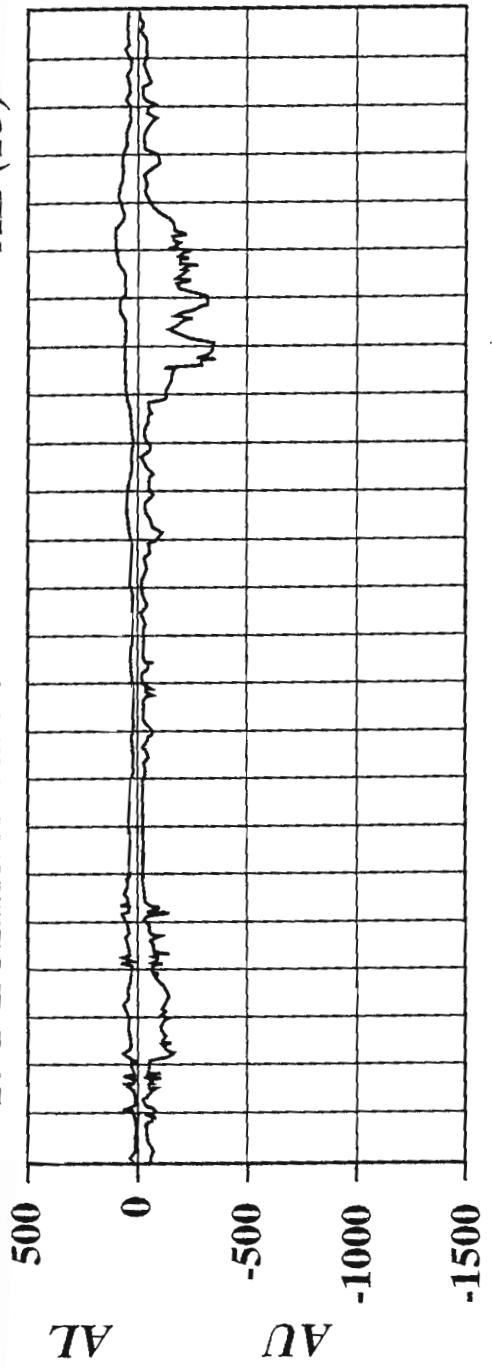


Fig. 2

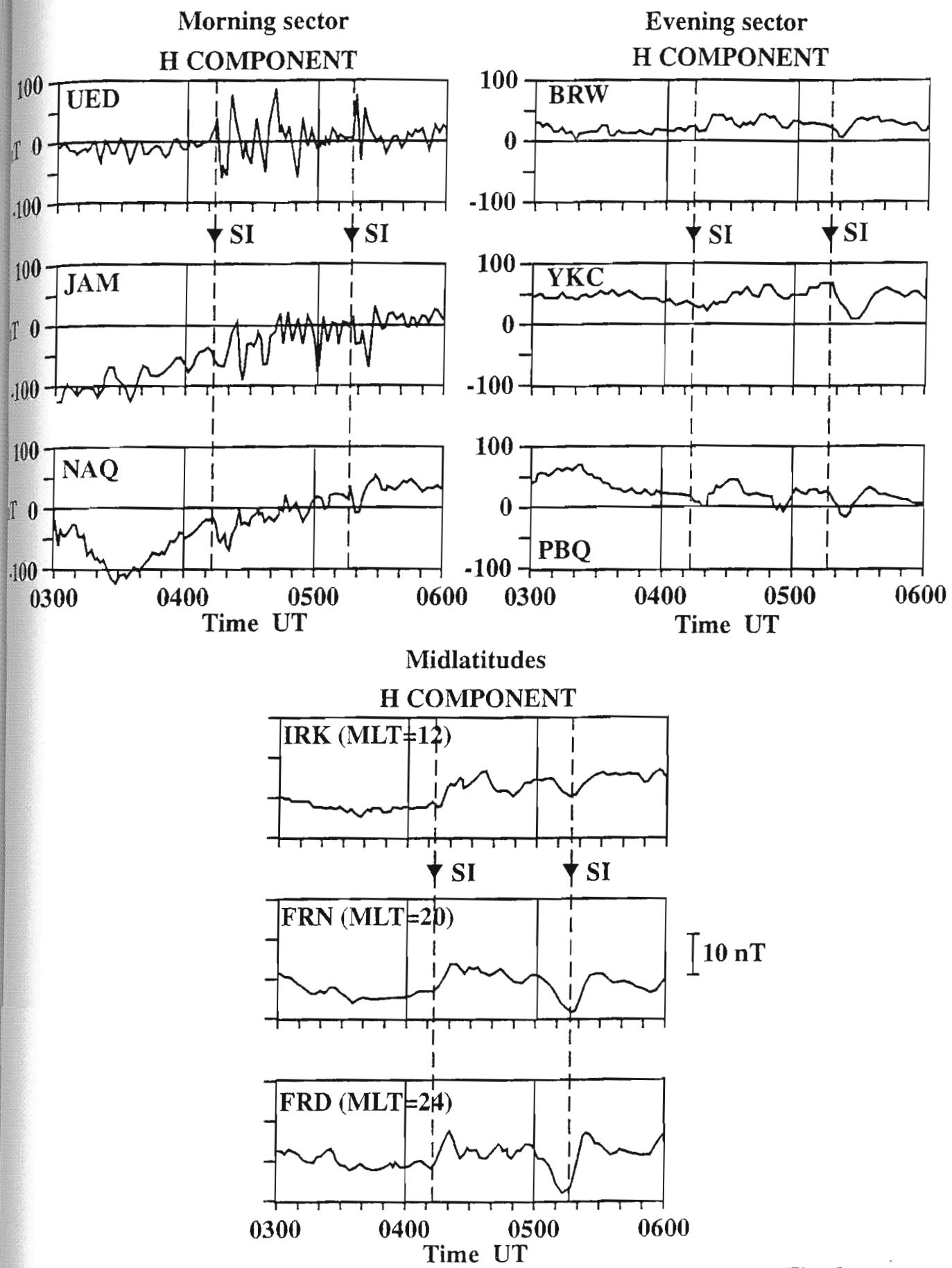


Fig. 3

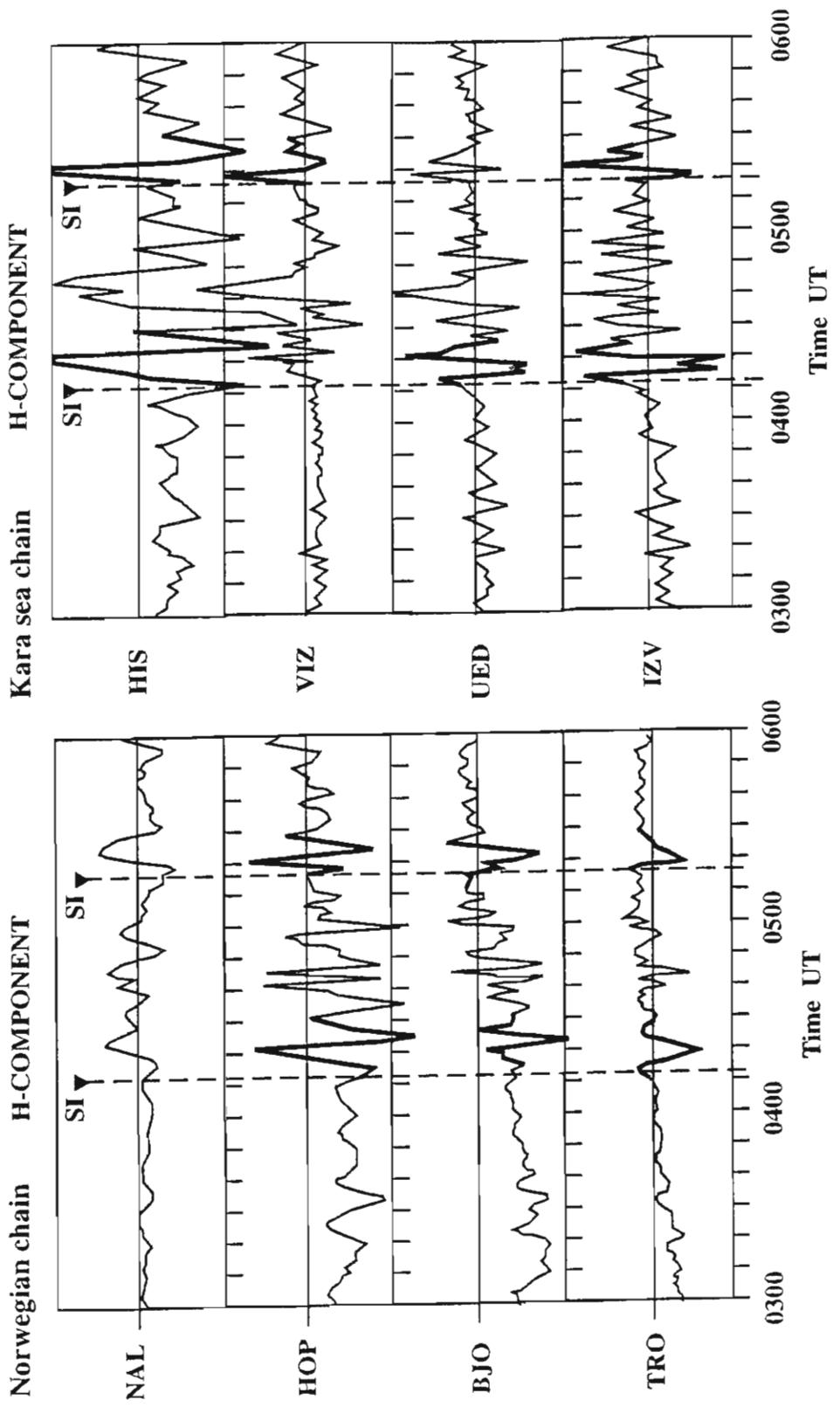


Fig. 4

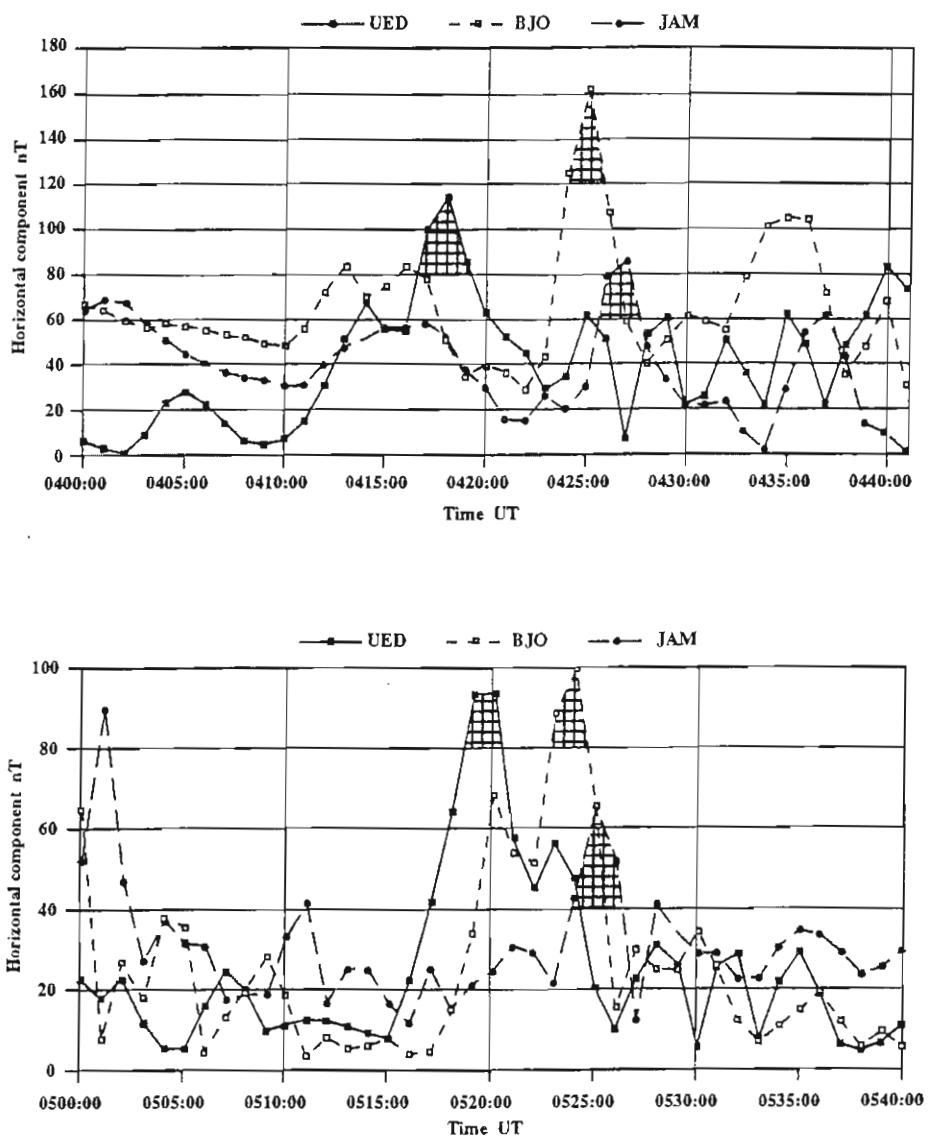


Fig. 5

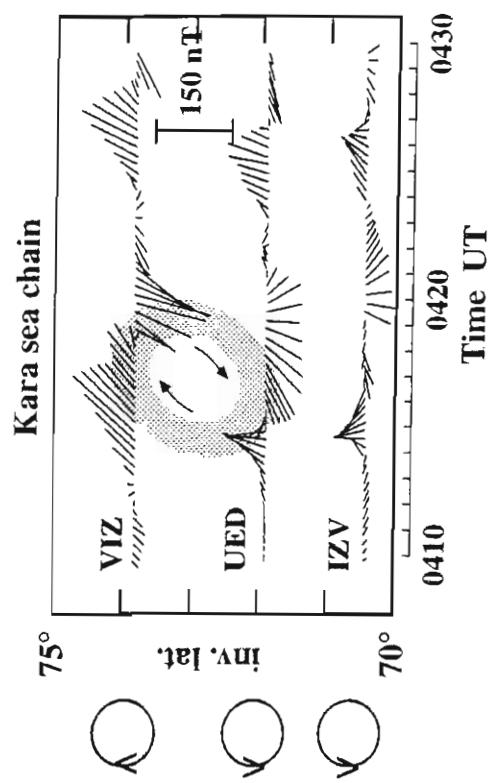
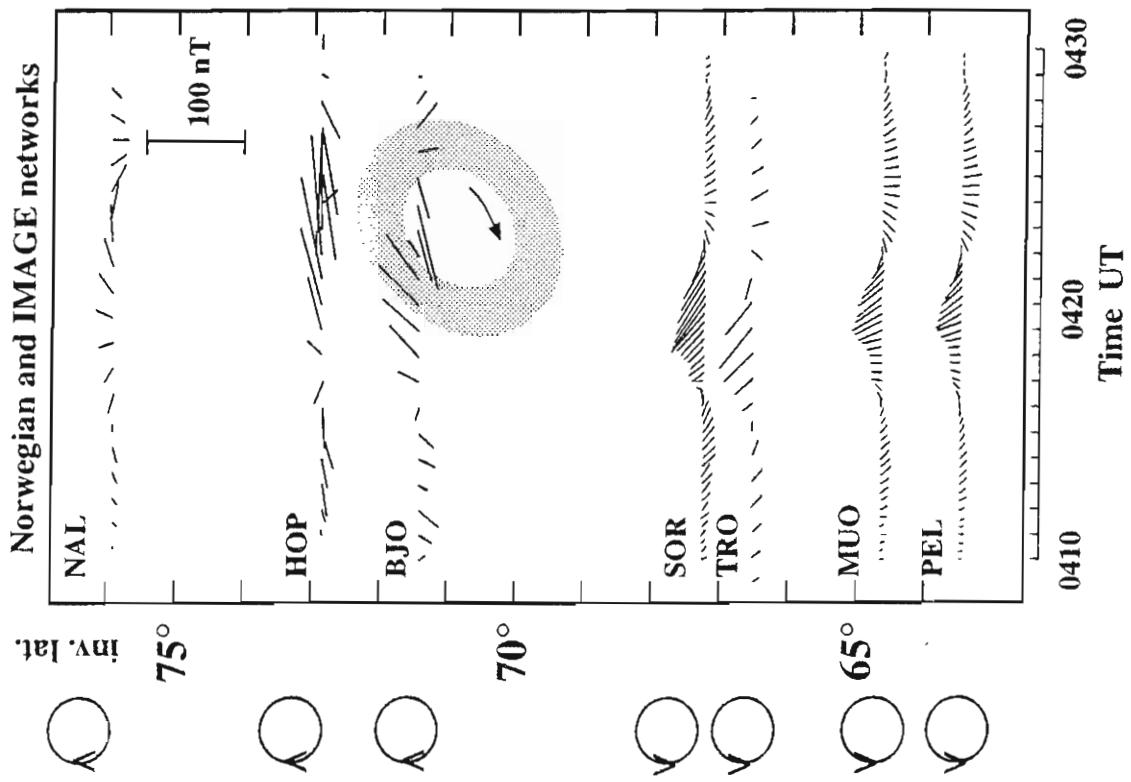


Fig. 6a

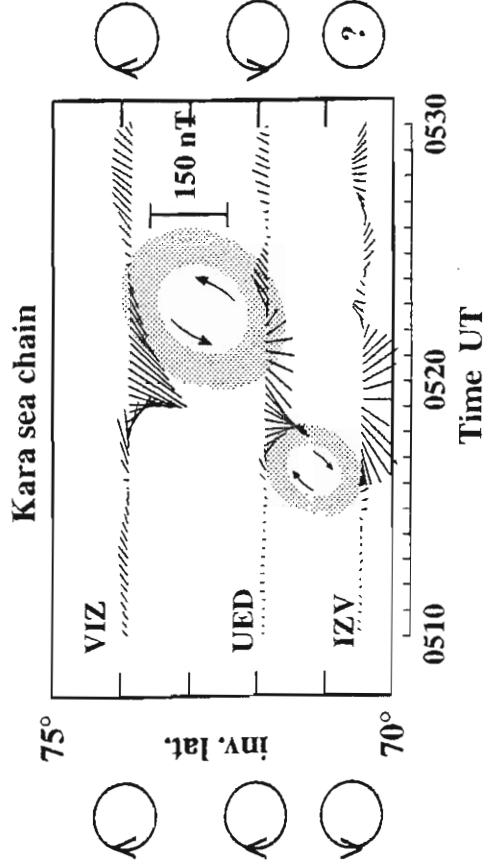
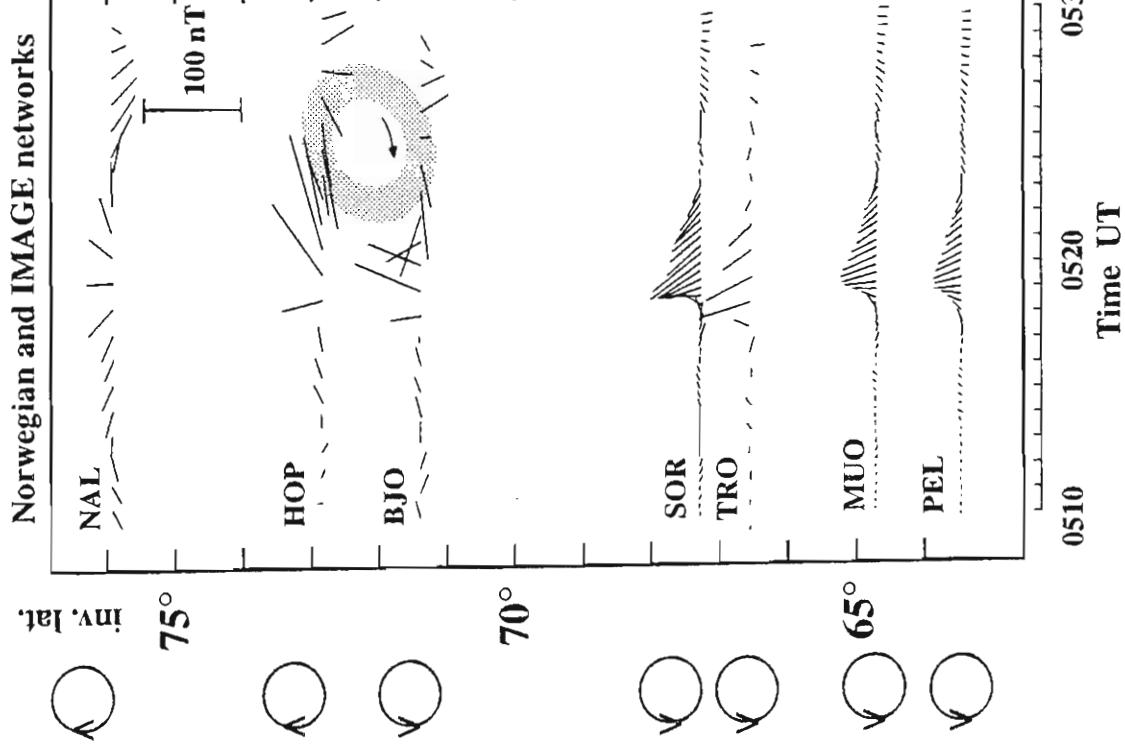


Fig. 6b

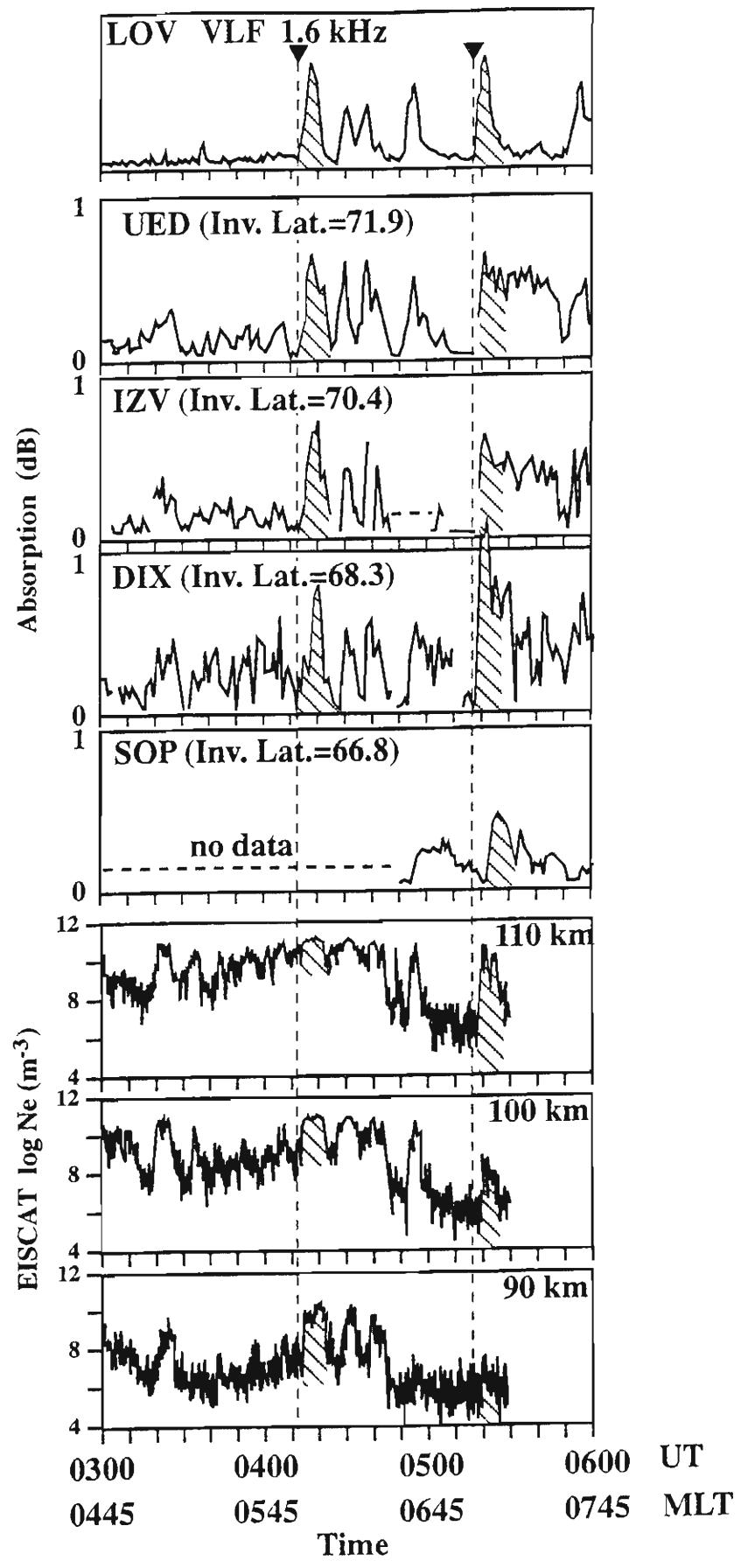


Fig. 7

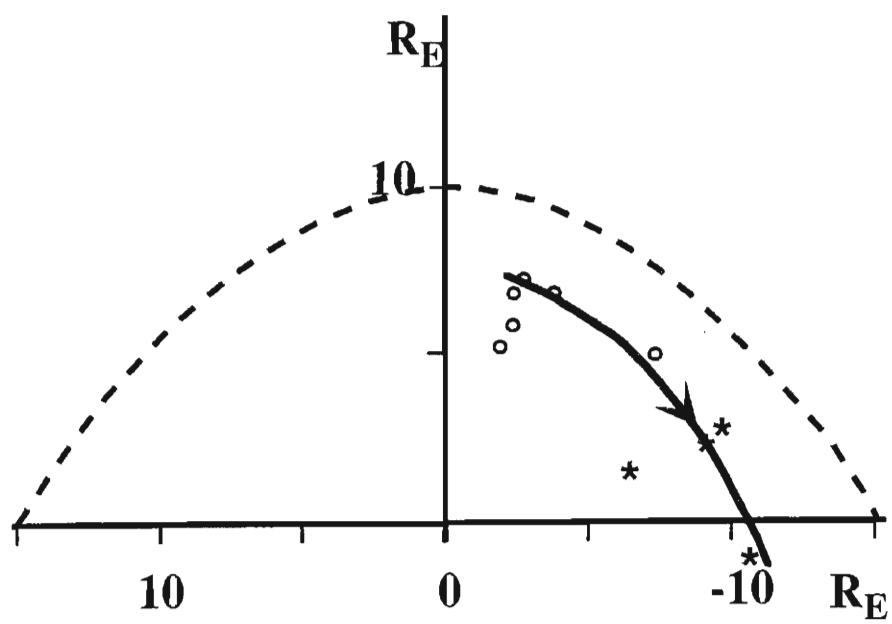


Fig. 8

Relations of VLF emissions to impulsive electron precipitation measured by EISCAT radar in the morning sector of auroral oval

J. MANNINEN,^{*} T. TURUNEN,[†] A. LUBCHICH,[‡] E. TITOV[‡] and T. YAHNINA[‡]

^{*}Department of Physics, Univ. of Oulu, Finland; [†]Sodankylä Geophysical Observatory, Finland;
[‡]Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

Abstract—E-region electron density variations were observed above Tromsø, Norway, by the EISCAT UHF radar (69.59°N , 19.23°E) in the morning hours on 17 December 1990. The density variations have been compared with the characteristics of the VLF emissions seen in the frequency range of 0.3–3 kHz observed in Sodankylä, Finland (67.51°N , 26.33°E) and in Lovozero, (Russia), (67.97°N , 35.08°E). Two different types of precipitation relating to VLF waves were found. The first type is in the form of precipitation impulses having only a few seconds duration repeating at intervals of some tens to a hundred seconds. The electrons were primarily produced by substorms which had commenced earlier in the midnight sector. The measured electron density profile suggests that the energy of the precipitating electrons is from below 20 to about 30 keV. Chorus emissions were simultaneously recorded showing properties which can be explained by the cyclotron instability in the magnetosphere. The second type of electron precipitation correlating with VLF waves has a duration of a few minutes. This precipitation is related to sudden impulses (SI) caused by a change in the solar wind pressure. The accompanying VLF waves had a frequency range from 1.5 to 2.5 kHz. The cyclotron instability together with the time dependent magnetic field during the magnetospheric compression can explain the spectral and temporal characteristics of this kind of electron precipitation and VLF waves.

1. INTRODUCTION

Electron precipitation is a very variable phenomenon in the auroral region in the morning sector. The spatial scale of variations extends from a few kilometres to a few thousands of kilometres and the temporal scale of the variation is from milliseconds to tens of minutes. Impulsive electron precipitation with repetition periods ranging from some seconds to tens of seconds are often seen in the recovery phase of a substorm, when energetic electrons generated in the midnight sector drift to the morning sector and fill the internal magnetosphere. It is believed that the main reason of the morningside electron precipitation is the wave-particle interaction.

Whistler waves are believed to play an important role in the generation of the pulsating electron precipitation and various mechanisms have been proposed. CORONITI and KENNELL (1970) considered the possibility that the hydromagnetic waves near the equator modulate the whistler waves responsible for pitch angle diffusion. The idea is appealing because magnetic Pi1 type pulsations are often observed on the ground in conjunction with pulsating auroras (HEACOCK and HUNSUCKER, 1977). However, OGUTI *et al.* (1986) found no relationship between pulsating aurora and magnetic field variations in the equatorial region. Pi1 (or PiC)

pulsations seem to be generated at relatively low altitudes (OGUTI *et al.*, 1984; OGUTI and HAYASHI, 1984) and probably they are not the cause of pulsating precipitation. In principle external modulation (e.g. long-period magnetic pulsation) of auroral precipitation causing pulsations is possible but no such external mechanism which satisfactorily explains the observed temporal and spatial structure in the morningside auroral has been found.

TREFALL *et al.* (1975), BESPAKOV and TRAKHTENGERTS (1976) and DAVIDSON (1979) proposed a mechanism based on relaxation oscillations of cyclotron instability parameters in the presence of a source of energetic particles in the region of instability to explain the impulsive bursts of precipitation in the morningside aurorae. However, the proposed mechanisms could not explain the observed periods of pulsations from 2 to 20 s. Inclusion of new resonant particles into the process of whistler cyclotron instability (WCI) improved the model (BESPAKOV and TRAKHTENGERTS, 1986). A more complete quantitative model for the formation of the pulsating patches was developed by TRAKHTENGERTS *et al.* (1986), and this model is based on the flow cyclotron maser in which the duct with enhanced plasma density serves as a resonator.

DAVIDSON (1986) also developed his model of the self-modulated pulsations in the outer trapped electron belts to explain the characteristics of pul-

sating auroral patches. In this model the whistler instability is cyclically excited and quenched as the loss cone is cyclically excited by electron precipitation and refilled by pitch angle diffusion.

Other sources of coherent or incoherent whistler waves could also be responsible for scattering electrons into the loss cone. The loss cone driven whistler instability is, however, a particularly attractive candidate for the pulsations without any need for external modulation processes.

The whistler instability can also be responsible for the electron precipitations with longer periods. Large amplitude variations in the solar wind dynamic pressure varying in time scales from 5 to 10 min are quite common (POTEMRA *et al.*, 1989; SIBECK *et al.*, 1989). The solar wind pressure variations are directly associated with compressional oscillations in the magnetic field as observed by satellites in the dayside magnetosphere (POTEMRA *et al.*, 1992). Wave-particle interactions modulated by compression of the magnetosphere can cause quasi-periodic variations in the electron precipitation and related ELF/VLF wave activity.

2. EXPERIMENTS

The EISCAT UHF experiment of 17 December 1990 was designed to study rapid electron density variations in pulsating aurora above Tromsø (inv.lat 66.4°N, inv.long 103.3°) with temporal resolution of 0.2 s and spatial resolution of 1.05 km in the altitude range from 75 km to 145 km. The radar beam was directed along the geomagnetic field line. Simultaneous VLF emission observations were made in Lovozerö (inv.lat. 64.1°N, inv.long. 114.7°) and Sodankylä (inv.lat. 63.9°N, inv.long. 107.1°), which are both located near $L=5$. The VLF-receivers were able to record emissions in the 0.3-10 kHz frequency range, but only the 0.3-3 kHz range has been used in this study. Data were recorded on magnetic tape or on paper chart in several frequencies. The analysis of VLF data gave very similar spectra for these two stations and almost a one-to-one correlation in discrete VLF emissions was obtained. In practice we can use VLF data alternatively either from Lovozerö or Sodankylä. Unfortunately, the weather was cloudy and the photometric measurements can only be used to show the changes of the auroral luminosity. Because of that we have not shown any optical data in this paper.

3. OBSERVATIONS

3.1. Impulsive electron precipitation during sub-storm

Two small magnetic substorms commenced after a magnetically quiet period in the midnight sector on 17 December 1990. Figure 1a shows the magnetogram from Narssarssuaq (local midnight at 0206 UT). Figure 1b shows the differential electron flux measured on-board the CRRES satellite in the pitch-angle range of 85°–95° and energy range of 20-60 keV. The satellite was in the night-time sector near the equatorial region at a distance of 6-7 R_E . The data from CRRES shown in Fig. 1b does not cover the beginning of the first substorm. A considerable increase of energetic electrons (30-50 keV) with dispersion in the beginning is seen to be related to the second substorm. The particle fluxes related to the first substorm are higher than the flux during the second substorm.

Two series of sudden enhancements of electron density in the E region were observed by EISCAT between 0230-0310 UT and 0320-0330 UT. Simultaneous photometer observations verified that the phenomenon was caused by impulsive particle precipitation having duration of only a few seconds. It seems quite safe to assume that these two intervals of the impulsive precipitation events are connected with substorms. The first sequence of precipitation impulses (event 1), as seen by the EISCAT radar, lasted about 40 min (from 0230 till 0310) and contained about twenty impulses of precipitation. The average energy deduced from the electron density profiles is of the order of 30 keV. The second sequence (event 2) continued only 7 min (from 0319 till 0326) and 8 clearly identified impulses of electron precipitation occurred. The average energy is a little lower than in event 1, of the order of 20 keV. We present the altitude-time behaviour of the electron density for the event 2 in Figure 2. Sharp enhancements of the electron density are seen at altitudes between 95 and 120 km. Decrease of the density with respect to the background values with the characteristic time of 30 - 40 s seen in this event can be totally explained by recombination (NYGRÉN *et al.*, 1992).

For event 2 the height variation of the maximum electron density, (h_{max}) is shown in Fig. 3. This height decreases during the event from about 111 km to about 102 km. After the last precipitation impulse, h_{max} increases to about 120 km. Quite similar behaviour was also observed during the event 1, when h_{max} varied between 100 and 96 km. The corresponding energy of the precipitating

electrons in event 1 is of the order of 30 keV and mostly less than 20 keV in event 2 with evidence of some systematic change of a few keV during the events as shown in Fig. 3.

The energy of electrons can be estimated from the height of the electron density maximum. The situation is non-stationary. For a precipitation impulse lasting only a few seconds the density profile depends almost totally on the production profile because the recombination and other loss mechanisms do not have time to alter it essentially. The energy of precipitating particles increases as shown in Fig. 4a where both the electron density and altitude of electron density maximum h_{max} are shown for two strong impulses belonging to event 2. The energy increases perhaps by about 3 keV (from ~ 27 keV up to ~ 30 keV) in some seconds. A similar behaviour was noticed also in the first pulses belonging to the impulses of event 1. However, at the end of event 1 the energy of the precipitating electrons decreased during the impulse. At that time the weak background precipitation was also decreasing.

During both events an increase in the VLF chorus activity was noted. During event 1 the activity was, however, limited to frequencies below 1 kHz and the detailed features of the emissions could not be reliably analysed because of local noise. The VLF emissions related to event 2 were at higher frequencies and the analysis was possible. In general the emissions were groups of rising tones.

Figure 3 shows the integrated power of VLF emissions together with the frequency of the maximum wave intensity as determined from the digitized VLF data from Sodankylä. Unfortunately, there was a break in the recording from 0315 till 0320 UT in Sodankylä due to technical reasons. However, an increase in the emission intensities was registered in Lovozero in that period but recordings only for discrete narrow frequency bands were available.

During the intense precipitation period several groups of chorus elements were detected in the frequency range of 1.3-1.9 kHz. In most cases the uppermost frequency of these VLF elements as well as the frequency of maximum intensity decreased. Two examples are presented in Fig. 4b.

3.2. Impulsive electron precipitation after SI in magnetic field

On 17 December 1990 between 0410 and 0530 UT EISCAT observed a different type of electron density variation related to particle precipitation.

High intensity precipitation lasted for a few minutes and the apparent quasi-period was of the order of 10 min. This precipitation is connected to a magnetic disturbance of the sudden impulse (SI) type, which is driven by solar wind pressure variations. The related SI events were registered e.g. at the mid-latitude station Irkutsk in the day sector about 0410 UT. Figure 5 shows a connection of an impulsive electron precipitation with VLF wave intensity variations together with the variation of the magnetic field at the mid-latitude ground-based station and on the geosynchronous orbit. EISCAT observes electron precipitation after the SI in the morning sector and a network of riometers registers the precipitation in the daytime sector (YAHNIN *et al.*, 1995). A good correlation is seen between the electron density enhancements registered by EISCAT and the riometer absorption observed at Uedenenie station. Impulsive variations of the VLF wave amplitude were simultaneously observed in the morning sector at Sodankylä and Lovozero stations. Similar VLF wave intensity variations were also observed in the daytime sector (Y.Novikov, private communication).

Corresponding variations of the magnetic field with a period of about 10 min were also observed by the geostationary satellite GOES-6 which was situated in the evening sector (MLT=18) during the event. Variations in the magnetic field ΔB were of the order of 2-5 nT in the northward component (parallel to the Earth's rotation axis), and the ratio of $\Delta B/B$ was about 0.02-0.06.

The data presented on Fig. 5 indicates that the impulsive precipitation burst observed by EISCAT after 0410 UT was connected to magnetospheric compression. Related phenomena, like the magnetic field increase in the evening magnetosphere, the extended precipitation region and related VLF activity in the morning sector, were seen on a global scale. Figure 6 shows that the most intense electron precipitation flux correlates with the increase of the VLF wave intensity and at the same time the electron density maximum moved to lower altitude. This indicates that the energy of the precipitating electrons increases just before each intense precipitation event. During the precipitation bursts the altitude of the electron density maximum is also at a fixed altitude showing that the energy spectrum of the precipitating particles is quite constant. Fig. 6 shows also that the frequency of the most intense VLF waves stayed almost constant during the precipitation event. The only exception is seen just after the SI (0414-0415 UT) when the frequency increased from 1.5 kHz to 2.0 kHz in less

than 1 min. Similar behaviour has been reported in connection with sudden commencements (e.g. HAYASHI *et al.*, 1968; GAIL *et al.*, 1990b). The behaviour seen during these events favours the explanation that the cyclotron wave-particle interaction is responsible for the precipitation.

4. DISCUSSION

Two events consisting of electron precipitation bursts with only some seconds duration and repeating at about 10-200 s intervals were measured by EISCAT in 17 December 1990 in the morning sector. The events were connected with the development of two substorms in the midnight sector. CRRES satellite data show that trapped electron flux in the equatorial region was more intense during the first substorm.

The simultaneous increase of VLF emissions and precipitating particle flux during the substorms indicates that the cyclotron instability is causing the precipitation. The precipitating particles involved in the process are drifting electrons generated during the substorm expansion phase.

Energetic electrons drifting towards the morning-side fill the magnetospheric trapping region. The cyclotron instability commences when the total amplification of VLF wave energy exceeds the total losses due to damping and absorption in the ionosphere. When the cyclotron instability starts, simultaneous increase of the electron precipitation and VLF wave intensity is seen as shown in Fig. 3.

At the L-value of Tromsø the equatorial gyrofrequency of electrons is 3.7 kHz. If one assumes the equatorial plasma frequency to be 10 kHz, and electron energy to be 30 keV and maximum VLF-frequency between 1.6 and 2.5 kHz, as found by measurements, then following the formulation given by BESPAKOV and TRAKHTENGERTS (1986), the anisotropy parameter gets values between 0.8-1.2 and the wave amplification coefficient will have a maximum in the frequency range of 1.1-1.4 kHz. This value approximately agrees with the measured frequencies at the intensity maximum of VLF emissions during event 2. The energy of precipitated electrons changed during impulses and roughly simultaneous VLF emission groups had corresponding changes. Two such kind of examples are shown in Fig. 4b. This can be explained by the variation of the anisotropy of the trapped particles when precipitation impulse develops. The frequency decreased from 1.7 to 1.4 kHz. For the used values of

equatorial gyrofrequency and assumed plasma frequency, the energy of the electrons should increase from 26 to 30 keV. The precipitation pulses measured by EISCAT at least roughly show this kind of variation in energy. Also the periodicity of the VLF emissions is about the same as observed in the precipitation impulses.

The foregoing discussion supports the idea that there is really a connection between the measured VLF emissions and the precipitation impulses. One has to remember, however, that the equatorial plasma frequency used in the estimates is totally based on an assumption and one has to remember also that we have not been able to connect unambiguously any of the observed chorus elements to some measured precipitation burst (unlike TSURUDA *et al.*, 1981 who were able to find one-to-one correlation). On the basis of the theories developed for the cyclotron instability one could at least with some assumptions expect a one-to-one relation.

There is a considerable distance of about 400 km between Tromsø and Sodankylä which was the nearest VLF station during the measurements. We see in any case almost the same emissions both in Lovozero and Sodankylä. The distance between these two sites is almost exactly the same as the distance between Sodankylä and Tromsø. One can thus assume that the Sodankylä VLF measurements quite well describe also the VLF emission structure which could be measured near Tromsø. However, the distance can explain the lack of one-to-one relation. It may well be that conjugate measurements were needed. On the other hand very good correlation has been found between VLF emission periods and periods seen in impulsive precipitation measured by EISCAT during the event 2. Some more detailed comparisons given above support also the idea that relationships between these phenomena exist i.e. wave-particle interactions may be verified. Using the available data, we cannot obtain any firm conclusions, but it seems clear, that under favourable conditions one can study the characteristics of the fine structure of the precipitating electrons and the corresponding wave-particle interaction processes by combining EISCAT data and ground based VLF data.

The electron precipitation observed by EISCAT after the SI correlated perfectly with the VLF wave intensity seen on the ground and the magnetic field variations on the geosynchronous orbit. The relationship between this precipitation and the VLF waves suggests that the precipitation was caused by the electron cyclotron instability developing at the equatorial plane. This mechanism has been

well studied and it is suggested to be responsible for the precipitation of the energetic electrons during a SI or SSC (PERONA, 1972).

The growth rate of the cyclotron instability is given by KENNEL and PETSCHEK (1966) and it is proportional to the gyrofrequency and anisotropy of the particles. Compression of the magnetosphere increases these parameters. The kinetic energy of trapped electrons increases due to the betatron acceleration. This all increases the growth rate.

The EISCAT data show that within a few minutes in the beginning of the precipitation the height of the electron density maximum sharply decreased (Fig. 6) showing that the precipitating electron energy increased. The initial stage of the event may be explained by betatron electron acceleration during compression, followed by subsequent cyclotron instability development, which increases the VLF wave intensity and the precipitating electron flux.

The height of the electron density maximum remained almost constant during the precipitation, which means that no essential change in the energy spectrum of the precipitating electrons occurred. If this precipitation was caused by the cyclotron wave-particle interaction, then the VLF wave spectrum must also be quite stable during the event. This is in fact the case as shown in Figure 6. It is worth noting that the precipitating electron spectrum was softer and the VLF wave frequency was higher in the events related to the SI than in the substorm related events considered earlier. This is in good agreement with the cyclotron mechanism.

Essential VLF wave spectrum variations occurred only in the beginning of the first precipitation event just after the SI when the VLF emission frequency increased from 1.5 kHz to 2.0 kHz within less than 1 min. Such increases seen after SSC and SI has been described by GAIL *et al.* (1990b) but further evolution of the VLF wave spectrum and

its connection with precipitating electron characteristics were not considered before. The frequency increase after SSC and SI is explained by the quasi-linear theory of the modified cyclotron instability taking into account the time dependent magnetic field (GAIL *et al.*, 1990a).

In our case the apparent period of precipitation and VLF wave variations is of the order of 10 minutes. We see similar periodicity in the magnetic field as observed on board GOES-6. Pulsations of the compressional type as observed by GOES-6 produce the greatest influence on the cyclotron instability growth rate.

We can conclude that in our case the events commencing after SI were related to solar wind pressure variations, which perhaps produced magnetopause surface waves or resonance oscillations in the magnetosphere with a period of about 10 min. These oscillations, in turn, produced variations of the equatorial magnetic field, which modulated the electron precipitation and the related VLF emissions via cyclotron instability.

Acknowledgements—We greatly acknowledge the support by civilians and personal of institutions who contributed to the Finnish SP-Auroral EISCAT campaign in December 1990. We mention here only the Polar Geophysical Institute in Apatity/Russia and the Geophysical Observatory in Sodankylä/Finland. The VLF measurements carried out in Sodankylä were supported by the Finnish Academy. We thank especially Mr Timo Turunen and Mr. Paavo Törmänen who took care of VLF measurements in Sodankylä. The authors acknowledge also Dr. A. Korth (MPI) who is PI of the wide-angle particle spectrometer on the CRRES satellite. Special thanks are pointed to Dr. T. Bösinger, Dr. A. Yahnin and Dr. L. Pershakov who helped us with magnetic data.

EISCAT is an international association supported by the research councils of Finland (SA), France (CNRS), Germany (MPI), Norway (NAVF), Sweden (NFR) and United Kingdom (SERC). We are indebted to the Director and staff of EISCAT for operating the facility.

REFERENCES

- BESPALOV, P. and TRAKHTENGERTS, V. 1976 The dynamics of cyclotron instability in a magnetic trap. *Fizika Plasmy* **2**, 397.
- BESPALOV, P. and TRAKHTENGERTS, V. 1986 The cyclotron instability in the Earth radiation belts. *Reviews of Plasma Physics* **10**, 155–292.
- CORONITI, F. and KENNEL, C. 1970 Electron precipitation pulsations. *J. geophys. Res.* **75**, 1279–1289.
- DAVIDSON, G. 1979 Self-modulated VLF wave-electron interactions in the magnetosphere: A cause of auroral pulsations. *J. geophys. Res.* **84**, 6517–6523.
- DAVIDSON, G. 1986 Pitch angle diffusion in morningside aurorae. 2. The formation of repetitive auroral pulsations. *J. geophys. Res.* **91**, 4429–4436.

- GAIL, W., INAN, U., HELLIWELL, R. and CARPENTER, D.
- GAIL, W., INAN, U., HELLIWELL, R., CARPENTER, D., KRISNASWAMY, S., ROSENBERG, T. and LANZEROTTI, L.
- HAYASHI, K., KOKUBUN, S. and OGUTI, T.
- HEACOCK, R. and HUNSUCKER, R.
- KENNEL, C. and PETSCHEK, H.
- NYGRÉN, T., KAILA, K., HUUSKONEN, A. and TURUNEN, T.
- OGUTI, T. and HAYASHI, K.
- OGUTI, T., MEEK, J. and HAYASHI, K.
- OGUTI, T., HAYASHI, K., YAMAMOTO, T., ISHIDA, J., HIGUCHI, T. and NISHITANI, N.
- PERONA, G.
- POTEMRA, T., LÜHR, H., ZANETTI, L., TAKAHASHI, K., ERLANDSON, R., MARKLUND, G., BLOCK, L., BLOMBERG, L. and LEPPING, P.
- POTEMRA, T., ZANETTI, L., ELPHINSTONE, R., MURPHREE, J. and KLUMPAR, D.
- SIBECK, D., BAUMJOHANN, W., ELPHIC, R., FAIRFIELD, D., FENNEL, J., GAIL, W., LANZEROTTI, L., LOPEZ, R., LÜHR, H., LUI, A., MACLENNAN, C., MCENTIRE, R., POTEMRA, T., ROSENBERG, T. and TAKAHASHI, K.
- TRAKHTENGERTS, V., TAGIROV, V. and CHERNOUSS, S.
- TREFALL, H., ULLALAND, S., STADSNES, J., SINGSTAD, I., PYTTE, T., BRØNSTRAD, K., BJORDAL, J., KARAS, R., BROWN, R. and MÜNCH, J.
- TSURUDA, K., MACHIDA, S., OGUTI, T., KOKUBUN, S., HAYASHI, K., KITAMURA, T., SAKA, O. and WATANABE, T.
- YAHNIN, A., TITOVA, E., LUBCHICH, A., BÖSINGER, T., MANNINEN, J., TURUNEN, T., TROSHICHEV, O. and KOTIKOV, A.
- 1990a Gyroresonant wave-particle interactions in a dynamic magnetosphere. *J. geophys. Res.* **95**, 15103-15112.
- 1990b Characteristics of wave-particle interactions during sudden commencements. 1. Ground-based observations. *J. geophys. Res.* **95**, 119-137.
- 1968 Polar chorus emission and worldwide geomagnetic variation. *Rep. Ionos. Space Res. Japan* **22**, 149-160.
- 1977 A study of concurrent magnetic field and particle precipitation pulsations, 0.005 to 0.5 Hz, recorded near College, Alaska. *J. atmos. terr. Phys.* **39**, 487-501.
- 1966 Limit of stably trapped particle fluxes. *J. geophys. Res.* **71**, 1-28.
- 1992 Determination of E region effective recombination coefficient using impulsive precipitation events. *Geophys. Res. Lett.* **19**, 445-448.
- 1984 Multiple correlation between auroral and magnetic pulsations. 2. Determination of electric currents and electric fields around a pulsating auroral patch. *J. geophys. Res.* **89**, 7467-7481.
- 1984 Multiple correlation between auroral and magnetic pulsation. *J. geophys. Res.* **89**, 2295-2303.
- 1986 Absence of hydromagnetic waves in the magnetospheric equatorial region conjugate with pulsating auroras. *J. geophys. Res.* **91**, 13711-13715.
- 1972 Theory on the precipitation of magnetospheric electrons at the time of a sudden commencement. *J. geophys. Res.* **77**, 101-111.
- 1989 Multi-satellite and ground-based observations of transient ULF waves. *J. geophys. Res.* **94**, 2543-2554.
- 1992 The pulsating magnetosphere and flux transfer events. *Geophys. Res. Lett.* **19**, 1615-1618.
- 1989 The magnetospheric response to 8-minute period strong-amplitude upstream pressure variations. *J. geophys. Res.* **94**, 2505-2519.
- 1986 A circulating cyclotron maser and pulsed VLF emissions. *Geomag. Aeron., Engl. Transl.* **26**, 77-82.
- 1975 Morphology and fine time structure of an early-morning electron precipitation event. *J. atmos. terr. Phys.* **37**, 83-105.
- 1981 Correlations between the very low frequency chorus and pulsating aurora observed by low-light-level television at $l \approx 4.4$. *Can. J. Phys.* **59**, 1042-1048.
- 1995 Dayside high latitude magnetic impulsive events: Their characteristics and relation to the sudden impulses. *J. atmos. terr. Phys.*

Figure 1. a) Magnetic H-component at the auroral station Narssarssuaq. The horizontal bars indicate the time of impulsive electron precipitation labelled as event 1 and event 2 in the text. b) Differential electron fluxes measured on-board CRRES satellite in pitch-angle range $85^\circ - 95^\circ$.

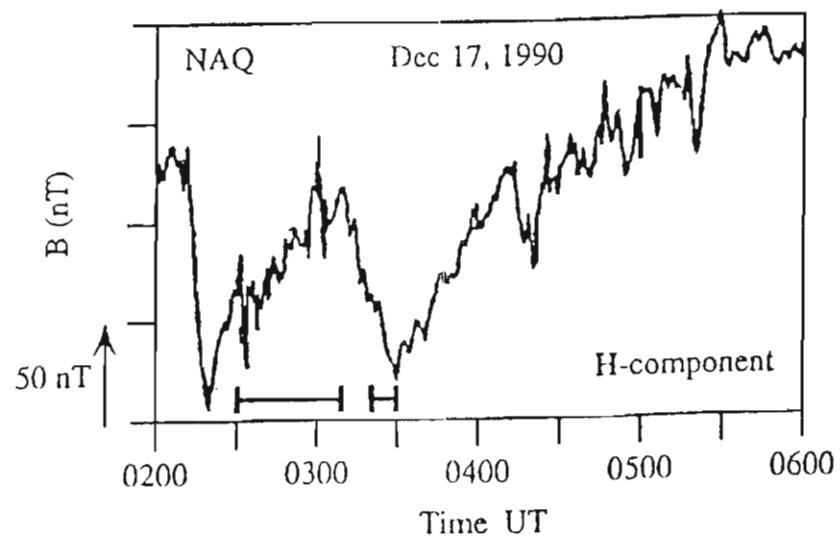
Figure 2. Electron densities measured by the EISCAT UHF radar on 17 December 1990 showing a set of impulsive precipitation events. Logarithmic density scales (from $10^{9.9}$ to 10^{11} m^{-3}) are given on the right. The event is called event 2 in the text.

Figure 3. Characteristics of the impulsive electron precipitation (event 2) measured by EISCAT, and some features of VLF waves observed at Sodankylä. From top to bottom: height of maximum electron density; 1-min. averages of the maximum electron density; VLF wave intensity and the frequency of VLF wave at maximum intensity.

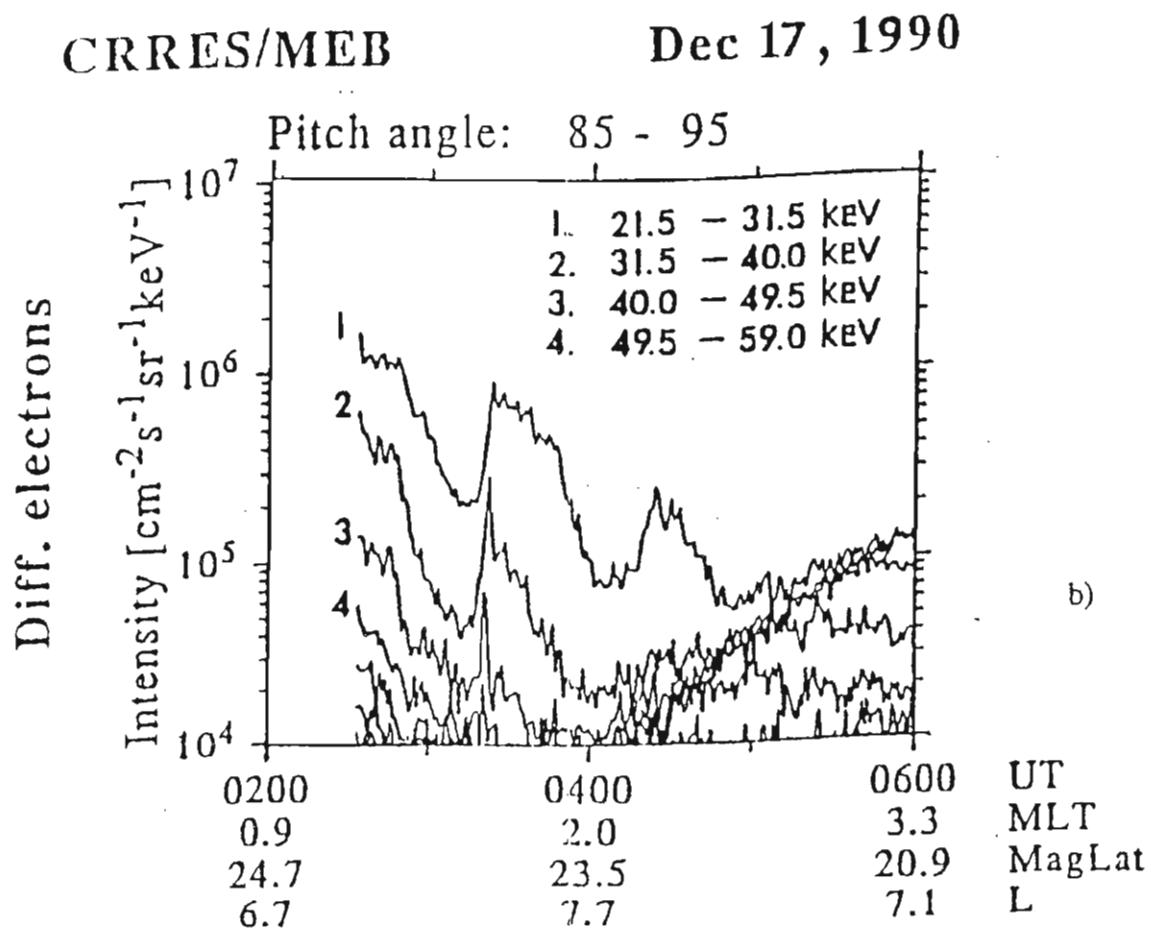
Figure 4. Behaviour of electron density maximum and its altitude during some seconds for two impulsive precipitation bursts and some VLF parameters for two emission bursts. a) The maximum electron density (top panels). The altitude of electron density maximum (bottom panels). Two examples from event 2. b) The upper frequency (dots) and the frequency at maximum intensity of chorus elements (squares).

Figure 5. The connection of the impulsive electron precipitation with VLF wave intensity variations and variations of the magnetic field at the mid-latitude ground-based station and on the GOES-6 satellite. From top to bottom: magnetogram of the mid-latitude station Irkutsk, magnetic field (northward component) variations registered by GOES-6 (18 MLT), riometer absorption observed in the day sector at station Uedinenie, the electron density variations on the altitude of 100 km and the variations of the VLF emission intensity at 1.6 kHz at Lovozero.

Figure 6. Characteristics of the impulsive electron precipitation after SI measured by EISCAT, and some features of VLF waves observed at Sodankylä. From top to bottom: the maximum electron density, height of maximum electron density, VLF wave intensity, the frequency of VLF wave at intensity maximum and dynamic spectrum of VLF in the frequency range of 0-5 kHz at Sodankylä.



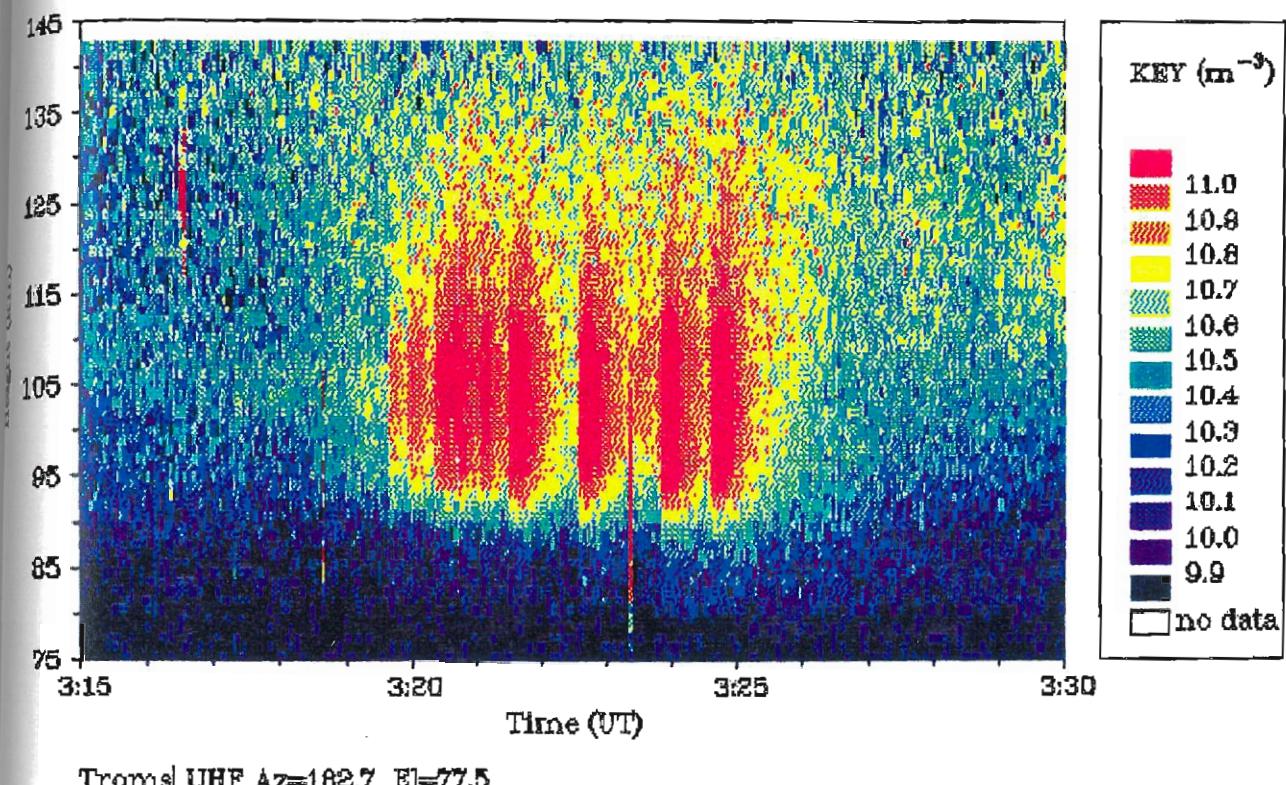
a)



b)

30.01.1991
Univ. of Oulu
Dept. of Physics

Power profile 17 Dec 1990



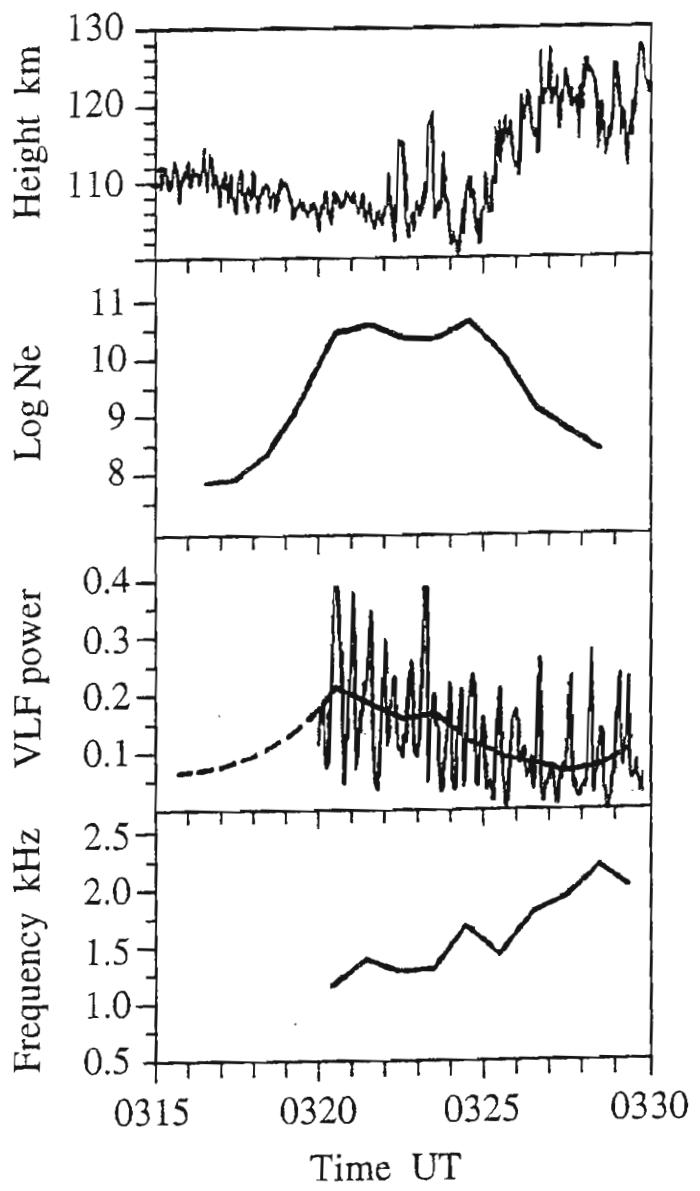
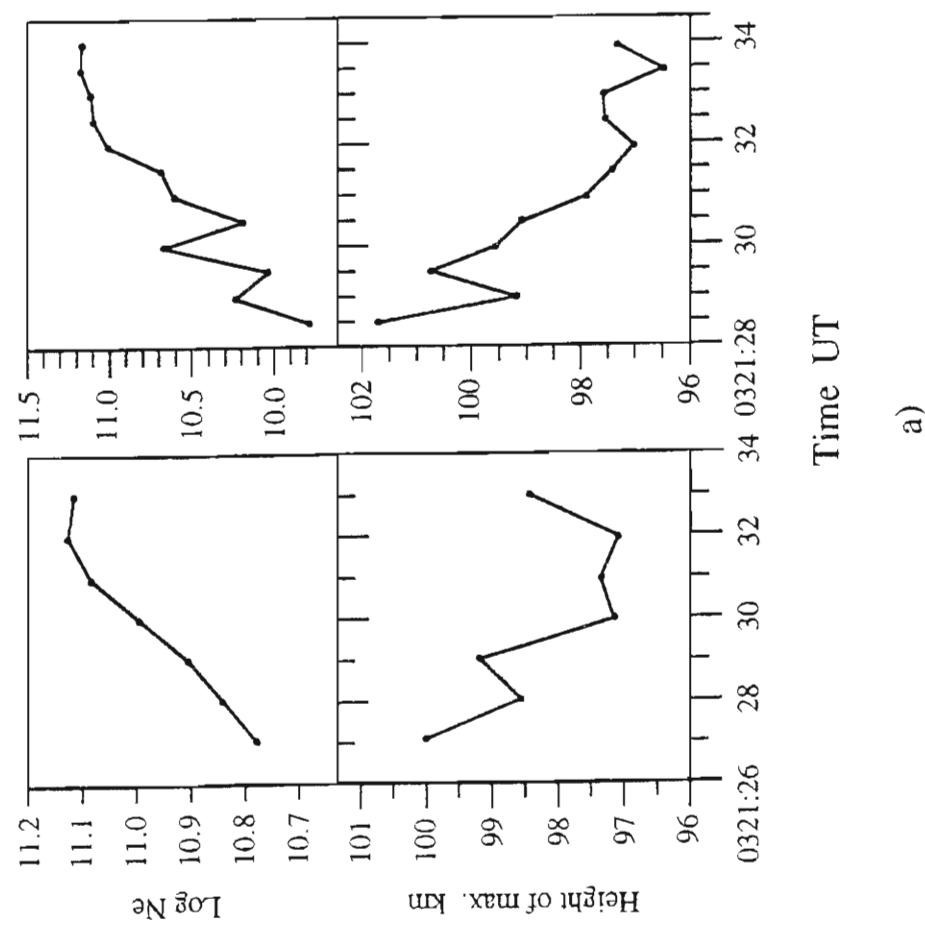
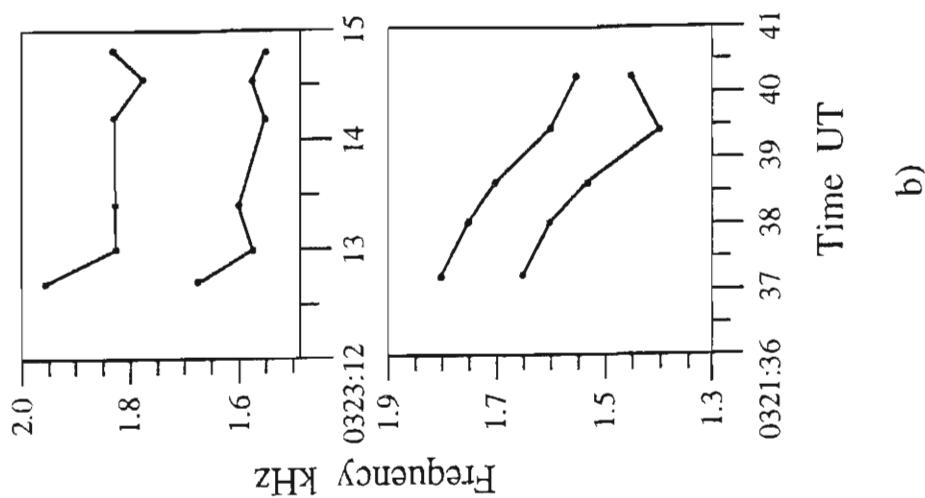


Fig. 3.



a)



b)

Fig. 4

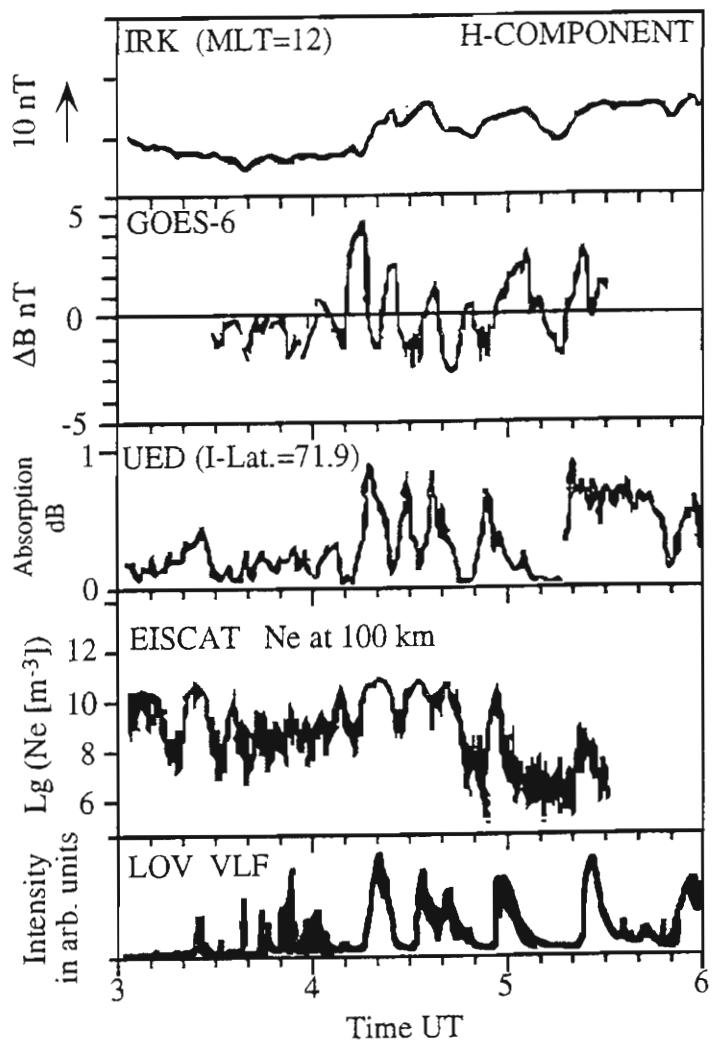


Fig. 6.
5

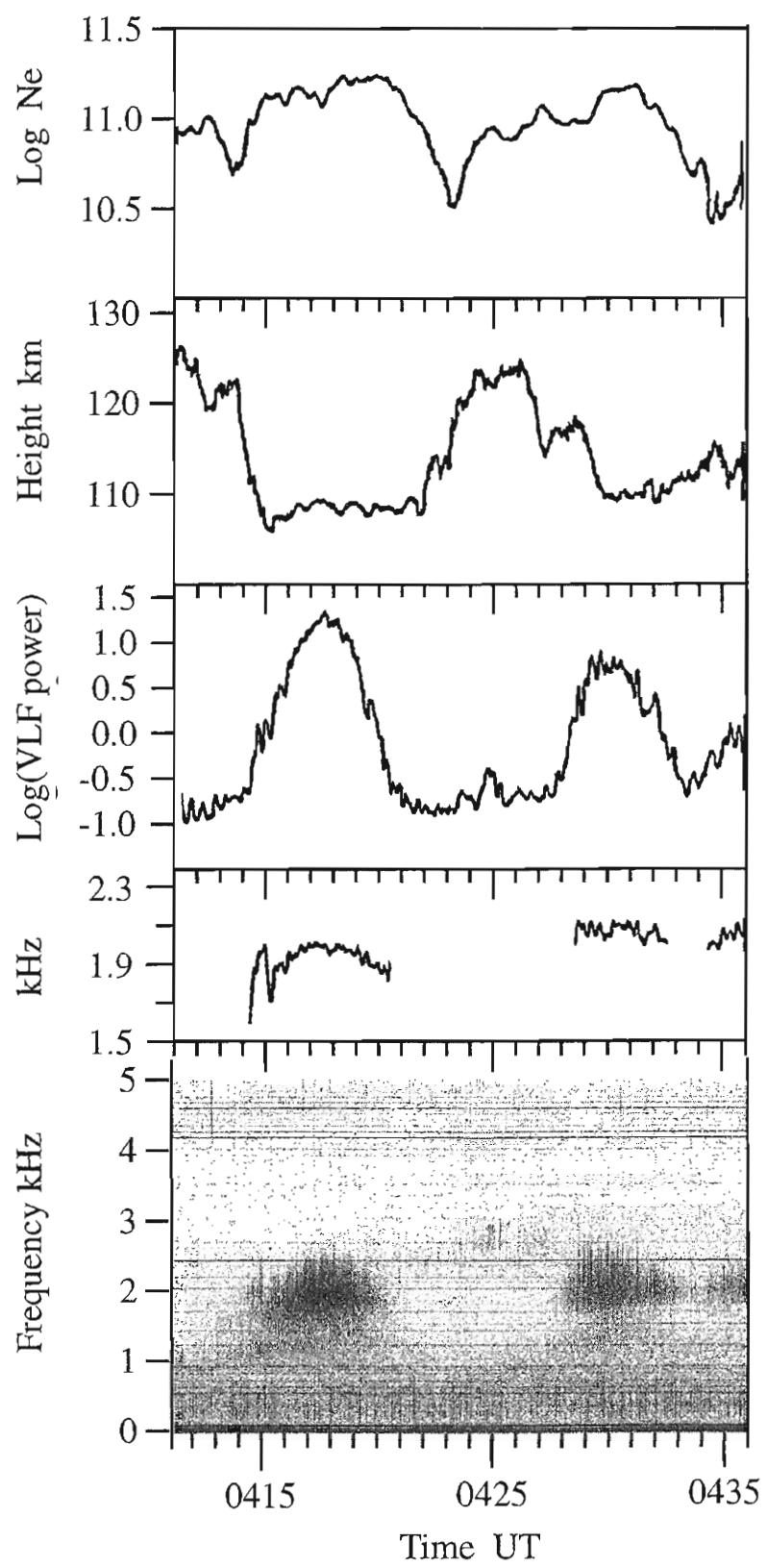


Fig. 6

Correlating optical emissions, quasi-periodic VLF emissions and magnetic Pc3 pulsations

Jyrki Manninen

Department of Physics, University of Oulu, Finland

Tauno Turunen and Johannes Kultima

Geophysical Observatory, Sodankylä, Finland

Elena Titova

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

Abstract

Regular magnetic pulsations of about 30-40 s periods (Pc3) have sometimes one-to-one correlation with quasi-periodic VLF emissions. It shows that the hydromagnetic wave can modulate the local parameters in space strongly enough that suitable conditions for particle interaction are formed. About a half of wavelength phase delay is usually seen between quasi-periodic VLF emissions and ULF wave on the ground because of difference in propagation velocity of waves. Wave-particle interaction should cause particle precipitation, which on the other hand should cause detectable optical emissions.

We have made simultaneous recordings of optical emissions, VLF emissions and magnetic pulsations at Porojärvi in Northern Finland at L-value of 6.1 on January 1993. Optical emissions were recorded by a simple wide angle photometer based on silicon photo diode without any filtering. On January 15, 1993 in late morning hours about 0555 UT a strong Pc3 event occurred and it continued several hours. Optical pulsation started at 0605 UT and continued to 0720 UT when the too much sunlight stopped the optical measurement. During that about one and half hours we could see correlating periodic variations both in optical emissions and VLF emissions simultaneously with Pc3 magnetic pulsation. Perfect correlation between VLF waves, optical emissions and pulsations was temporarily seen after sun rising.

1. Introduction

Pc3 domain waves are believed to be generated in the solar wind outside the magnetosphere by solar wind protons. The waves propagate into the magnetosphere and can be detected also on the ground. The periods are of the order of 30-40 seconds and at least on the ground the waveform is quite regular and

monochromatic. Period seems to be well related to the solar wind speed and it has been found that $f(\text{mHz}) \approx 6B$ (nT), where B is the IMF magnitude [1-3]. Engebretson et al. [4] showed that this relationship also appears to be true for some of the high-latitude pulsations.

Near and inside the plasmasphere these waves give rise to a set of other phenomena. One is the generation of quasi-periodic VLF-waves [5-8]. This is seen as periodically changing intensity and spectral structure of various hiss and chorus components at least in the frequency domain from a few hundred Hz to a few kHz. The observed time delays between the wave phases of Pc3 waves and the periodic variation of VLF waves indicate, that the region where the modulation takes place is somewhere in the equatorial zone near the plasmapause or in plasmasphere.

If we believe on the explanation given by Troiskaya et al. [2] that the magnetic waves are originally generated outside the magnetopause, then necessarily the magnetic wave is the source wave and the behaviour of the VLF waves is only a modulation caused by the magnetic wave. The growth of VLF waves gets the energy from the energetic particles in wave-particle interactions and as a result precipitation of particles to the atmosphere is possible. The precipitation of electrons having energies of tens or hundreds of keV can be detected on the ground easily by measuring the D-layer absorption of HF waves e.g. by ionometers. Precipitation of electrons at lower energies are often observed by measuring optical emissions from E- and lower F-layer altitudes.

We have done measurements of magnetic pulsation, optical pulsations, VLF, and absorption pulsation in January 15, 1993 at Porojärvi having L-value of about 6.1.

2. Instrumentation

Magnetic pulsation was measured by 2-component induction coil magnetometer. Optical pulsation was measured by a simple photo diode wide-angle (about 45 degrees) nonfiltered photometer having response from about 500 to 1050 nm. VLF was measured by 2-component VLF-receiver with $1000 \text{ turn} \cdot \text{m}^2$ areas and bandwidth from 0.250 to 9.250 kHz. These instruments were located in Porojärvi ($69^\circ 10' \text{N}$, $21^\circ 28' \text{E}$), which is near the widely known Kilpisjärvi measuring station. For absorption measurements we have used our nearby ionometer stations which are Kevo, Kilpisjärvi and Ivalo.

3. Observations

In the morning and noon hours on January 15, 1993 a strong Pc3 event took place. The Pc3 type magnetic pulsation event commenced at about 0551 UT and continued for several hours. The pulsation event was strong and peak-to-peak amplitudes were temporarily in excess of 10-15 nT. Pulsations were structured changing often in amplitude in time scales of a few minutes or tens of minutes. For most of the time practically one-to-one correlation was found between quasi-periodic VLF-events and Pc3 pulsations a couple of hours later in the same morning (Figure 1). The strongest magnetic pulsation observed about 40 s after VLF chorus variation. That is in agreement with the difference of the propagation velocity of ULF and VLF waves if the interaction has assumed to take place at equatorial region.

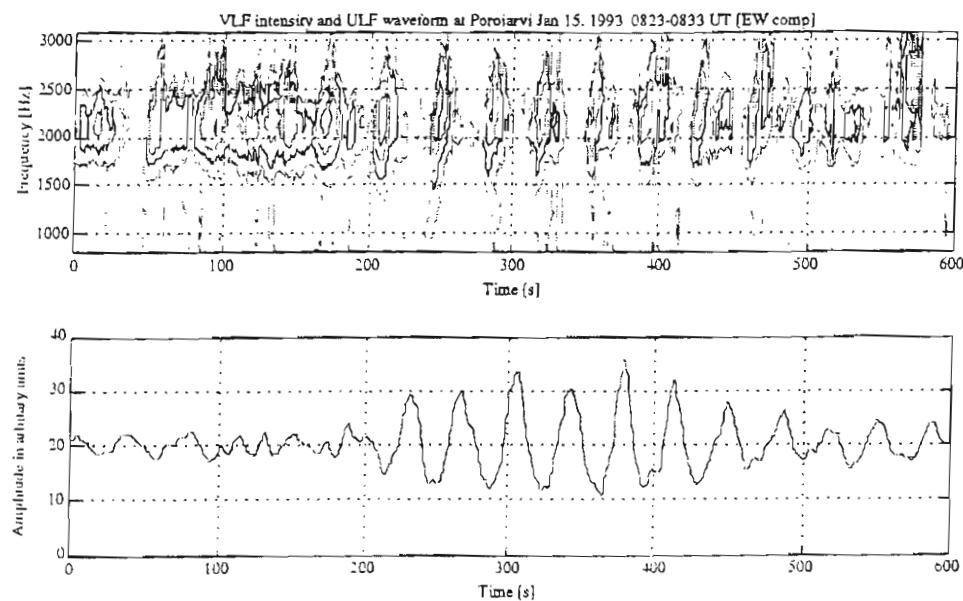


Figure 1a. Intensity variation of VLF chorus bursts in the frequency range of 0-3.1 kHz at 0823-0833 UT are shown as a contour plot in upper panel and EW component of magnetic field variation with arbitrary units is shown in lower panel.

Optical pulsation was noted for the first time at about 0600 UT. The pulsation clearly correlated with Pc3 and there is practically not doubt that those two phenomena were closely coupled. The recording of optical pulsation stopped at 0722 UT (0922 LT), when the background light finally caused the detector amplifier to saturate. An example of the magnetic and optical pulsation is shown in Figure 2 for period a little before the detector system saturated. The intensity variation is small but, however, several times stronger than necessary in order to be detectable. The figure is done by computer processing the direct penrecorder traces. It is interesting to note that for all the period when the correlation was found, the ambient light level is so high that the usual photomultiplier based systems cannot be used.

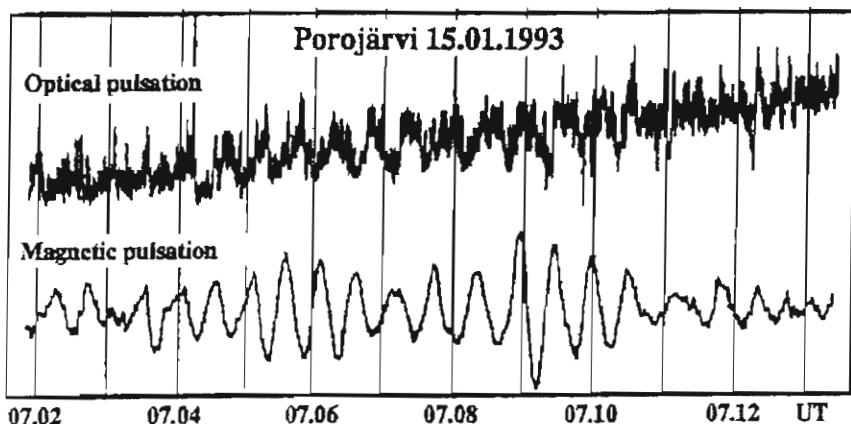


Figure 2. Simultaneous optical and magnetic pulsations measured at Porojärvi between 0702 UT and 0713 UT. The clearest correlation can be found during the time interval 0704-0711 UT. The amplitude scales of both recordings are arbitrary.

There are several riometer stations in Northern Finland. Figure 3 shows the absorption measured in Kilpisjärvi, Kevo and Ivalo. One can conclude that there is absolutely no indication of pulsating absorption.

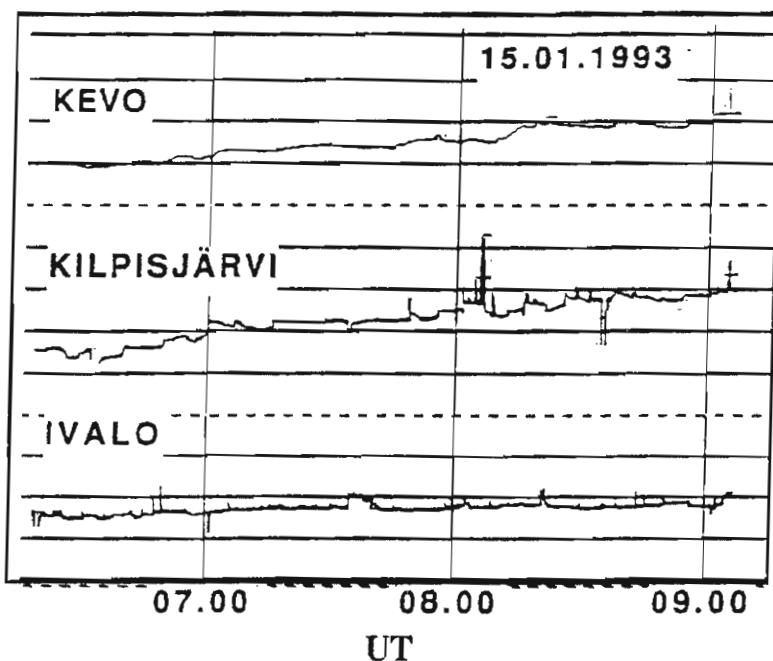


Figure 3. Riometer recordings from Kevo, Kilpisjärvi and Ivalo between 0610 UT and 0910 UT. Tiny absorption variation can be noticed but no detectable pulsating absorption is seen.

4. Summary

Clear correlation between optical and magnetic Pc3 pulsation was found during an event when Pc3 correlated most of time perfectly with periodic VLF-emissions. No indication of pulsating absorption was noted.

As a summary it seems that Pc3 wave caused modulation of VLF-waves and it caused periodic intensity variation of low energy (perhaps from hundreds of eV to some keV) precipitating electrons in the late morning hours. Within the detectability of the available instruments it did not cause periodic variation of precipitation of high energy electrons in tens of keV range.

Acknowledgements—The authors greatly acknowledge the Polar Geophysical Institute in Apatity, Russia, and Sodankylä Geophysical Observatory, Finland. We thank especially Mr. Keijo Nuutinen and Mr. Erkko Saviaro who were as assistants during the experiment at Porojärvi. We acknowledge also the Research council of Finland (SA) for financial support.

5 References

1. Troitskaya, V.A., Plyasova-Bakunina, T.A. and Gulelmi, A.V. (1971). Relationship between Pc2-4 pulsations and the interplanetary magnetic field. *Dokl. Akad. Nauk. USSR*, **197**, 1312.
2. Troitskaya, V.A., Gulelmi, A.V., Bolshakova, O.V., Matveyeva, E.T. and Schepetnov, R.V. (1972), Indices of geomagnetic pulsations. *Planet. Space Sci.* **20**, 849.
3. Gulelmi, A.V., Plyasova-Bakunina, T.A. and Shchepetnov, R.V. (1973). Relation between the period of geomagnetic pulsations Pc3,4 and the parameters of the interplanetary medium at the earth's orbit. *Geomagn. Aeron.* **13**, 331.
4. Engebretson, M.J., Meng, C.I., Arnoldy, R.L. and Cahill, L.J.Jr. (1986). Pc3 pulsations observed near the South Polar Cusp. *J. Geophys. Res.* **91**, 8909-8918.
5. Carson, W.B., J.A. Koch, J.H. Pope, and R.M. Gallet (1965). Long period very low frequency emissions, *J. Geophys. Res.* **70**, 4293-4303.
6. Sato, N., and S. Kokubun (1980). Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Quasi-periodic ELF-VLF emissions associated with Pc 3-4 magnetic pulsations and their geomagnetic conjugacy, *J. Geophys. Res.* **85**, 101-113.
7. Sato N. and S. Kokubun (1981). Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Regular period ELF-VLF pulsations and their geomagnetic conjugacy, *J. Geophys. Res.* **86**, 9-18.
8. Sato, N. and H. Fukunishi (1981). Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Classification of quasi-periodic ELF-VLF emissions based on frequency time spectra, *J. Geophys. Res.* **86**, 19-29.

ON THE RELATIVE MOTIONS OF WHISTLER CHANNELS
AND AURORAL FORMS DURING
AN AURORAL SUBSTORM

MANNINEN, J.K.¹⁾ and TURUNEN, T.²⁾

1) Department of Physics, University of Oulu, SF-90570 Oulu, Finland

2) Geophysical Observatory, SF-99600 Sodankylä, Finland

Abstract.

In this work 860 whistlers have been analyzed covering the period from 2000 UT to 0024 UT on February 14.-15., 1991. Magnetic activity was moderately high and a clear substorm onset was at about 2340 UT. The night was exceptional in the sense that the amount of whistlers was very high. A comparison has been made on the relative locations of auroral forms and the active whistler channels.

The analysis was done using *Tarcsai's* (1975) diffuse equilibrium model. This method gives e.g. the L-value of the whistler paths and the equatorial electron density in whistler channels. The whistler channels were detected between $L = 2.4 - 4$ but they clustered near a well defined boundary between $L = 3.5 - 3.9$ during the studied period. The measured equatorial electron densities at the whistler channel boundary are of the order of 400 el/cm^3 , which proposes that the boundary was just inside the plasmapause.

The auroral forms were all the time located at higher L-values than any of the detected whistlers. Only during one and half hour period before the onset at 2340 UT the movements of the whistler channel boundary were related to the movements of the equatorward boundary of the auroral illumination.

The substorm itself does not seem to alter the position of the whistler channel boundary in any remarkable way although tiny movements are clearly detectable.

1. Introduction

Whistlers are an interesting phenomena in space physics because they connect ground level thunderstorms and magnetospheric phenomena together. During last decades the whistlers have been investigated quite much but not very often numerous whistlers have been analysed during the same event.

In this work 860 whistlers have been analyzed covering the period from 2000 UT to 0024 UT on February 14.-15., 1991.

Magnetic activity was moderately high and a substorm onset took place at about 2340 UT. The night was exceptional in the sense that the amount of whistlers was very high. A comparison

has been made on the relative locations of auroral forms and the whistler channels.

2. Instrumentation

The data has been measured using combination of a two-component VLF receiving system (EW and NS components), an auroral TV low-light-camera and a two-component pulsation magnetometer. ULF data has been multiplexed to VLF band using frequency modulation and then they have been recorded to the audio track of VHS-video tape. Time information has been multiplexed to camera signal and then TV-pictures have been recorded to the video track of the same tape.

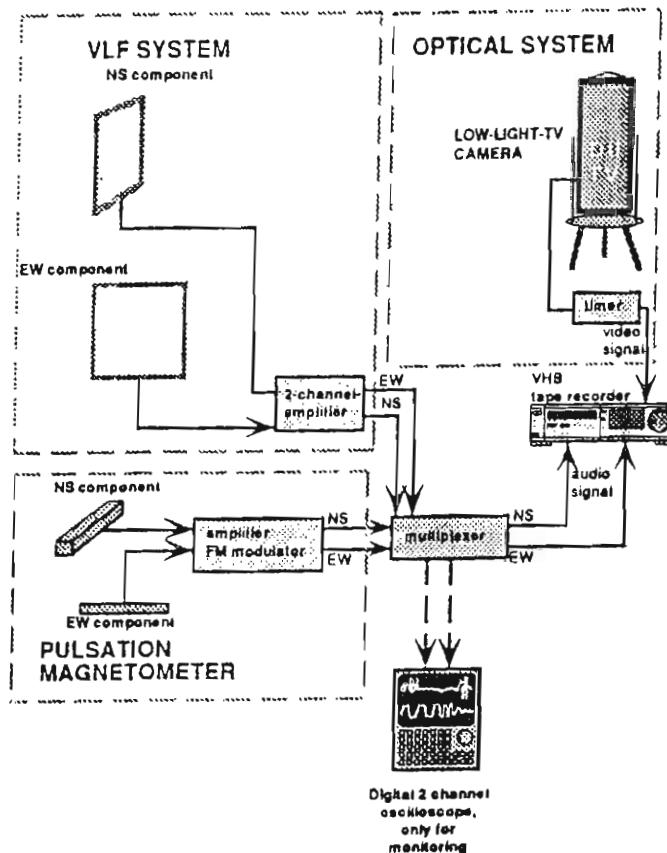


Fig. 1: The recording system used for VLF, ULF, aurora, and magnetic measurements.

The VLF receiver can detect waves with intensities above 6.7×10^{-17} W/m²Hz per one antenna in the frequency range from 200 Hz to 8 kHz.

The low-light-camera has the field of view of $84^\circ \times 105^\circ$.

3. Whistler analysis

The whistlers have been analyzed covering the period from 2000 UT to 0024 UT on February 14.-15., 1991. All whistlers were analysed using a signal analyzer and every one of them was

printed on the paper. The best time-frequency pairs were taken into account. The frequency points were chosen within the frequency range 2750 Hz to 6000 Hz in 250 Hz steps.

Those time-frequency pairs have been analysed using Tarcsai's (1975) diffuse equilibrium model. That model was chosen because of all the whistlers propagated inside of the plasmapause. It gives the nose frequency, the dispersion during the travelling path, the nose delay, the gyrofrequency of electrons in the equatorial plane, the L-value of the whistler propagation path, the equatorial electron density in whistler channels, the electron density in the ionosphere at 1000 km altitude, and the total number of electrons within the whistler path.

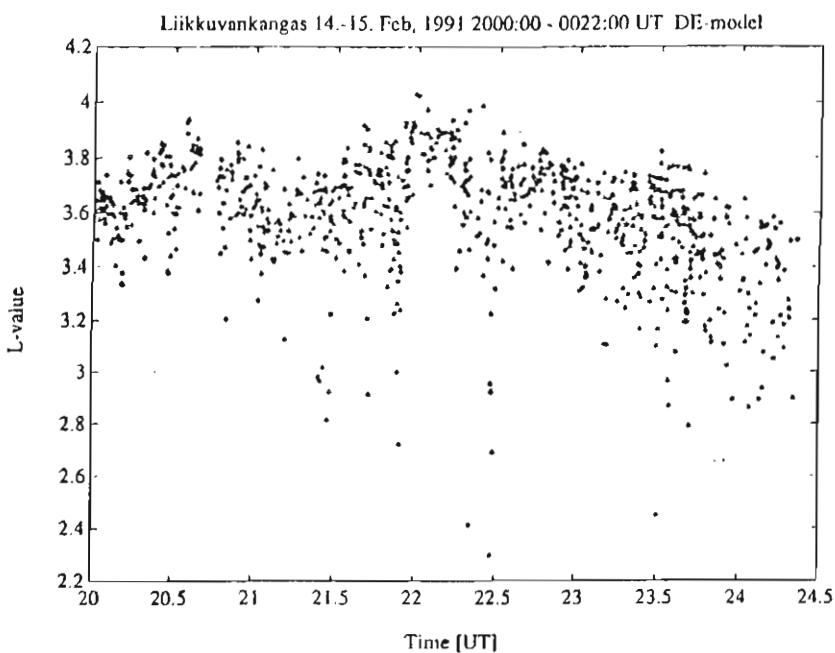


Fig. 2: The L values of analysed whistlers versus time.

Different kind of comparisons have been made with results e.g. time vs. L value (fig. 2.), time vs. equatorial electron density N_e , and L value vs. equatorial electron density. The most useful is the first one when relation to the motion of the auroral forms is studied. We have approximated the whistler channel boundary by fitting a straight line to the observed N_e , L values of all whistler channels measured in 5 minutes intervals and by defining from that line the point where N_e equals 400 el/cm^3 . In practice this value coincides always almost exactly with the highest observed L value of whistlers in the selected time interval. The result is shown in figure 3.

The whistler channels were detected between $L = 2.4 - 4$ but they clustered near a well defined boundary between $L = 3.5 - 3.9$ during the studied period. The equatorial electron densities in the whistler channels vary between 400 cm^{-3} and 700 cm^{-3} . It seems that most whistler channels are very near the plasmapause which has been shown to be a good VLF wave guide (Inan and Bell, 1977).

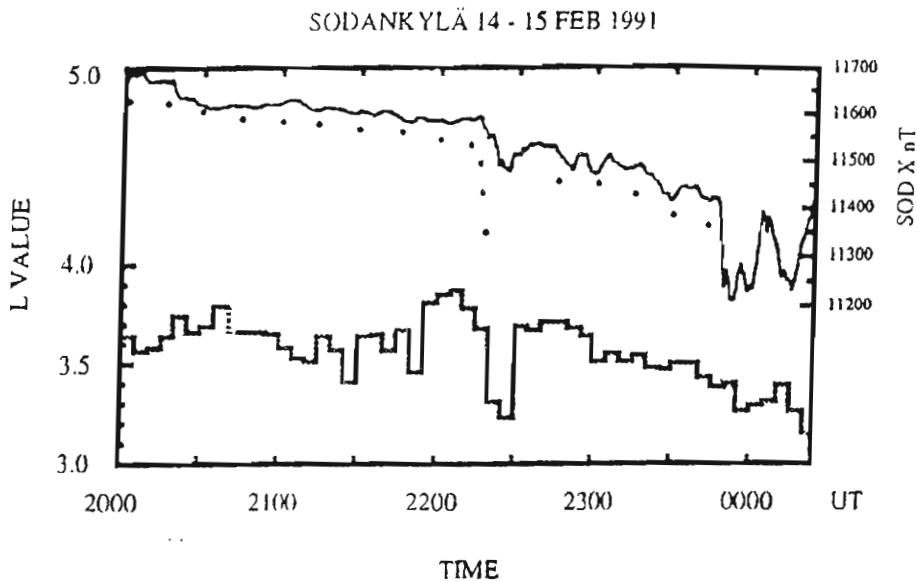


Fig. 3: The L value of whistler boundary (lowest curve), magnetic X component (uppermost curve) and equatorward boundary of the observable auroral illumination as determined from the auroral TV pictures (dots) between 2000 and 0024 UT.

4. Auroral motion

The auroral activity started at about 1800 UT and a few weak arcs appeared in the north. At 1930 UT those arcs passed the zenith of the measuring station and continued to move southward.

The magnetic X component decreased slowly until 2214 UT when a tiny short lived disturbance occurred. Up to this time the equatorward boundary of the auroral illumination moved slowly southward but during the magnetic disturbance at 2214 UT a clear rapid equatorward motion took place followed by movement back in a way we have not been able to define exactly. After that disturbance the equatorward movement continued in quite a similar way as earlier until a clear substorm onset at 2340 UT caused active aurora and made the determination of the border impossible from the available recordings.

Before 2140 UT the whistler channel boundary located around $L=3.7$ showing small excursions without any recognizable connection with the magnetic excursions and auroral boundary. Around 2200 UT the channel boundary moved poleward to $L=3.9$ from where it moved rapidly equatorward to $L=3.3$ at the same time as the tiny magnetic disturbance and related equatorward movement of auroral illumination took place. Even the value of the relative movements seem to be the same. At 2230 UT the whistler channel boundary moved rapidly back to about $L=3.7$ from where it moved slowly equatorward reaching $L=3.2$ at 0024 UT. The clear substorm having onset at 2340 UT caused just noticeable equatorward movement of the whistler channel boundary. Between 2230 UT and 2340 UT the auroral illumination border and the whistler channel boundary had very similar trend in their movement.

After 2340 UT we have not been able to define the auroral border.

5. Discussion

We have approximated the movement of the whistler channel boundary and compared it with the border of the auroral illumination. Our channel boundary seems to be just inside the plasmapause. The auroral illumination is always located at higher L values than the whistler channel boundary we have observed. The movements of the whistler channel boundary and the movements of the border of the auroral illumination are quite unrelated except between 2214 UT and 2340 UT i.e. from the first tiny magnetic disturbance to the onset of a substorm, when the movements seem to be in fact closely related. The substorm itself commencing at 2340 UT does not have any remarkable effects in the whistler boundary movements. We have not yet studied the nature of the magnetic disturbance between 2214 UT and 2340 UT but clearly it is different from the other parts of the studied period. If our whistler channel boundary reflects the movements of the plasmapause then only at that time interval the movements of the border of the auroral illumination and the plasmapause were coupled together.

The motions of the individual whistler ducts have been clearly observed earlier by e.g. *Block and Carpenter* (1974). We have not been able to define this kind of movement from our data.

6. Conclusion

Although the amount of whistlers was really high – we have analyzed a whistler for every 20 seconds on the average – none of the whistlers propagated at higher L-values than the whistler channel boundary. This is interesting also because most of the whistler channels were just at the boundary or only at slightly lower L-values.

The auroral forms were all the time located at higher L-values than any of the detected whistlers. Only during one and half hour period preceding the onset of substorm the movements were coupled but the substorm itself did not cause any remarkable effects. However, the nature of the magnetic activity has to be studied more carefully, especially the nature of the tiny disturbance at 2214 UT before final conclusions. Also the importance of the local time must be further considered in the studied case. The analysis shows in any case that under suitable conditions whistlers can be used to study even the details of the processes near the plasmapause during magnetic events. On the other hand by experience such conditions are rarely met which makes the data used in this preliminary study very exceptional.

REFERENCES

- Block L.P. and D.L. Carpenter. Derivation of magnetospheric electric fields from whistler data in a dynamic geomagnetic field. *J. geophys. Res.* **79**, 2783, 1974.
- Inan U.S. and T.F. Bell. The plasmapause as a VLF wave guide. *J. geophys. Res.* **82**, 2819, 1977.
- Tarczai Gy. Routine whistler analysis by means of accurate curve fitting, *J. atmos. terr. Phys.* **37**, 1447, 1975.

LÄHDELUETTELO

- Akimoto K. and D. Winske (1989). Nonlinear generation of whistler waves by an ion beam, *J. Geophys. Res.* **94**, 17259–17265.
- Allcock G.McK. (1957). A study of the audio-frequency radio phenomenon known as 'dawn chorus', *Aust. J. Phys.* **10**, 286–298.
- Araki T. (1977). Global structure of geomagnetic sudden commencements, *Planet. Space Sci.* **25**, 373–384.
- Bell T.F. and O. Buneman (1964). Plasma instability in the whistler mode caused by a gyrating electron stream, *Phys. Rev.* **133**, 25–26.
- Benediktov E.A., G.G. Getmantsev, Yu.A. Sazonov and A.F. Tarasov (1965). Preliminary results of measurements of the intensity of distributed extraterrestrial radio-frequency emission at 725 and 1525 kHz frequencies by the satellite Electron-2, *Kosm. Issled.*, **3**, 614–617.
- Bittencourt J.A. (1988). *Fundamentals of Plasma Physics*, Pergamon Press Ltd., A. Wheaton & Co. Ltd., Exeter, Great Britain, p. 712.
- Block L.P. and D.L. Carpenter (1974). Derivation of magnetospheric electric fields from whistler data in a dynamic geomagnetic field, *J. Geophys. Res.* **79**, 2783–2789.
- Brice N. (1965). Multiphase periodic very-low-frequency emissions, *Radio Sci.* **69D**, 257–265.
- Bullough K., A.R.L. Tatnall and M. Denby (1976). Man-made ELF/VLF emissions and the radiation belts, *Nature* **260**, 401.
- Burton E.T. and E.M. Broadman (1933). Audio-frequency atmospherics, *Proc. Inst. Radio Eng.* **21**, 1476–1494.
- Cairó L. and F. Lefèuvre (1986). Localization of sources of ELF/VLF hiss observed in the magnetosphere: Three-dimensional ray tracing, *J. Geophys. Res.* **91**, 4352–4364.
- Campbell W.H. (1966). A review of the equatorial studies of rapid fluctuations in the Earth's magnetic field, *Ann. Geophys.* **22**, 492–501.
- Cannon P.S. (1982). Ionospheric ELF radio signal generation due to LF and/or MF radio transmissions—I. Experimental results, *J. Atmos. Terr. Phys.* **44**, 819–829.
- Cannon P.S., T. Turunen and M.J. Rycroft (1982). Ionospheric ELF radio signal generation due to LF and/or MF radio transmissions—II. Interpretation, *J. Atmos. Terr. Phys.* **44**, 831–841.

- Cao M., R.L. McPherron and C.T. Russell (1994). Statistical study of ULF wave occurrence in the dayside magnetosphere, *J. Geophys. Res.* **99**, 8731–8753.
- Carpenter D.L. and N.T. Seely (1976). Cross-L plasma drifts in the outer plasmasphere: Quiet time patterns and some substorm effects, *J. Geophys. Res.* **81**, 2728–2736.
- Carpenter D.L. and R.R. Anderson (1992). An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.* **97**, 1097–1108.
- Carson W.B., J.A. Koch, J.H. Pope and R.M. Gallet (1965). Long period very low frequency emissions, *J. Geophys. Res.* **70**, 4293–4303.
- Church S.R. and R.M. Thorne (1983). On the origin of plasmaspheric hiss: Ray path integrated amplification, *J. Geophys. Res.* **88**, 7941–7957.
- Cornilleau-Wehrlin N., J. Solomon, A. Korth and G. Kremser (1988). Non-stationary effects in wave-particle interactions during storm sudden commencements (SSC), *Physica Scripta* **37**, 437–442.
- Coroniti F.V. and C.F. Kennel (1970). Electron precipitation pulsations, *J. Geophys. Res.* **75**, 1279–1289.
- Davidson G.T. (1986a). Pitch angle diffusion in morningside aurorae. 1. The role of the loss cone in the formation of impulsive bursts of precipitation, *J. Geophys. Res.* **91**, 4413–4427.
- Davidson G.T. (1986b). Pitch angle diffusion in morningside aurorae. 2. The formation of repetitive auroral pulsations, *J. Geophys. Res.* **91**, 4429–4436.
- Davidson G.T. (1990). Pitch-angle diffusion and the origin of temporal and spatial structures in morningside aurorae, *Space Sci. Rev.* **53**, 45–82.
- Davidson G.T. and Y.T. Chiu (1991). An unusual nonlinear system in the magnetosphere: A possible driver for auroral pulsations, *J. Geophys. Res.* **96**, 19353–19362.
- Davidson G.T., P.C. Filbert, R.W. Nightingale, W.L. Imhof, J.B. Reagan and E.C. Whipple (1988). Observations of intense trapped electron fluxes at synchronous altitudes, *J. Geophys. Res.* **93**, 77–95.
- Demekhov A.G. and V.Yu. Trakhtengerts (1994). A mechanism of formation of pulsating aurorae, *J. Geophys. Res.* **99**, 5831–5841.
- Dowden R.L. (1962a). Doppler-shifted cyclotron radiation from electrons: A theory of very low frequency emissions from the exosphere, *J. Geophys. Res.* **67**, 1745–1750.
- Dowden R.L. (1962b). Very low frequency discrete emissions received at conjugate points, *Nature* **195**, 64–65.
- Dowden R.L. (1971). VLF discrete emissions deducted from Helliwell's theory, *J. Geophys. Res.* **76**, 3046–3054.

- Draganov A.B., U.S. Inan, V.S. Sonwalkar and T.F. Bell (1992). Magnetospherically reflected whistlers as a source of plasmaspheric hiss, *Geophys. Res. Lett.* **19**, 233–236.
- Duncan R.A and G.R.A. Ellis (1959). Simultaneous occurrence of subvisual aurorae and radio noise bursts on 4.6 kc/s, *Nature, Lond.* **183**, 1618–1619.
- Dunckel N., B. Ficklin, L. Rorden and R.A. Helliwell (1970). Low frequency noise observed in the distant magnetosphere with OGO 1, *J. Geophys. Res.* **75**, 1854–1862.
- Ellis G.R.A. (1957). Low frequency radio emission from aurorae, *J. Atmos. Terr. Phys.* **10**, 302–306.
- Ellis G.R.A. (1959). Low frequency electromagnetic radiation associated with magnetic disturbances, *Plant. Space Sci.* **1**, 253–258.
- Ellis G.R.A. (1964). On external radio emission from the Earth's outer ionosphere, *Australian J. Phys.* **17**, 63–74.
- Engebretson M.J., J.R. Beck, R.L. Raideren, S.B. Mende, R.L. Arnoldy, L.J. Cahill Jr. and T.J. Rosenberg (1994). Studies of the occurrence and properties of Pc 3–4 magnetic and auroral pulsations at South Pole, Antarctica, *Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves* eds. M.J. Engebretson, K. Takahashi and M. Scholer, Geological Monograph 81, AGU, USA, 345–353.
- Ergun R.E., E. Klementis, C.W. Carlson, J.P. McFadden and J.H. Clemmons (1991). Wavelength measurement of auroral hiss, *J. Geophys. Res.* **96**, 21299–21307.
- Erlandson R.E., L.J. Zanetti, M.J. Engebretson, R. Arnoldy, T. Bösinger and K. Mursula (1994). Pc 1 waves generated by a magnetospheric compression during the recovery phase of a storm, AGU Monograph on *Solar Wind Sources of Magnetospheric ULF Pulsations*, 399–407.
- Fukunishi H., T. Toya, K. Koike, M. Kuwashima and M. Kawamura (1981). Classification of hydromagnetic emissions based on frequency-time spectra, *J. Geophys. Res.* **86**, 9029–9039.
- Gail W.B. (1990). Theory of electromagnetic cyclotron wave growth in a time-varying magnetoplasma, *J. Geophys. Res.* **95**, 19089–19097.
- Gail W.B., U.S. Inan, R.A. Helliwell, D.L. Carpenter, S. Krishnaswamy, T.J. Rosenberg and L.J. Lanzerotti (1990a). Characteristics of wave-particle interactions during sudden commencements. 1. Ground-based observations, *J. Geophys. Res.* **95**, 119–137.
- Gail W.B., U.S. Inan, R.A. Helliwell and D.L. Carpenter (1990b). Gyroresonant wave-particle interactions in a dynamic magnetosphere, *J. Geophys. Res.* **95**, 15103–15112.
- Gail W.B. and U.S. Inan (1990). Characteristics of wave-particle interactions during sudden commencements. 2. Spacecraft observations, *J. Geophys. Res.* **95**, 139–147.

- Gendrin R. (1965). Gyroresonance radiation produced by proton and electron beams in different regions of the magnetosphere, *J. Geophys. Res.* **70**, 5369–5383.
- Ginzburg M.A. (1961). Electromagnetic radiation from solar corpuscular streams, *Phys. Rev. Lett.* **7**, 399–401.
- Glassmeier K.-H. (1980). Magnetometer array observations of a giant pulsation event, *J. Geophys.* **48**, 127–138.
- Gulelmi A.V., T.A. Plyasova-Bakunina and R.V. Shchepetnov (1973). Relation between the period of geomagnetic pulsations Pc3,4 and the parameters of the interplanetary medium at the Earth's orbit, *Geomagn. Aeron.* **13**, 331–334.
- Gurnett D.A. (1991). Auroral plasma waves, *Auroral Physics*, edited by C.-I. Meng, M.J. Rycroft, and L.A. Frank, Cambridge UP, 241–254.
- Gurnett D.A. (1974). The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation, *J. Geophys. Res.* **79**, 4227–4238.
- Gurnett D.A. (1966). A satellite study of VLF hiss, *J. Geophys. Res.* **71**, 5599–5615.
- Gurnett D.A. and B.J. O'Brien (1964). High-latitude geophysical studies with satellite Injun 3. 5. Very-low-frequency electromagnetic radiation, *J. Geophys. Res.* **69**, 65–89.
- Harang L. and R. Larsen (1964). Radio wave emissions in the VLF-band observed near the auroral zone – I. Occurrence of emissions during disturbances, *J. Atmos. Terr. Phys.* **27**, 481–497.
- Hargreaves J.K. (1979). *The Upper Atmosphere and Solar-Terrestrial Relations*, Van Nostrand Reinhold Co. Ltd. New York, USA, p. 297.
- Hayashi K., S. Kokubun and T. Oguti (1968). Polar chorus emission and worldwide geomagnetic variation, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **22**, 149–160.
- Hayashi K., T. Oguti, T. Watanabe, K. Tsuruda, S. Kokubun and R.E. Horita (1978). Power harmonic radiation enhancement during the sudden commencement of a magnetic storm, *Nature* **275**, 627–629.
- Helliwell Robert A. (1965). *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*, Stanford University Press, Stanford, California, p. 349.
- Helliwell R.A. (1967). A theory of discrete VLF emissions from the magnetosphere, *J. Geophys. Res.* **72**, 4773–4790.
- Helliwell R.A., J.P. Katsufakis, T.F. Bell and R. Raghuram (1975). VLF line radiation in the Earth's magnetosphere and its association with power system radiation, *J. Geophys. Res.* **80**, 4249–4257.
- Helliwell R.A., J. Katsufakis, M. Trimpi and N. Brice (1964). Artificially stimulated very-low-frequency radiation from the ionosphere, *J. Geophys. Res.* **69**, 2391–2394.

- Helliwell R.A., S.B. Mende, J.H. Doolittle, W.C. Armstrong and D.L. Carpenter (1980). Correlation between $\lambda 4278$ optical emissions and VLF wave events observed at $L \sim 4$ in the Antarctica, *J. Geophys. Res.* **85**, 3376–3386.
- Hruska A. (1966). Cyclotron instabilities in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.* **71**, 1377–1384.
- Huang C.Y., C.K. Goertz and R.R. Anderson (1983). A theoretical study of plasmaspheric hiss generation, *J. Geophys. Res.* **88**, 7927–7940.
- Huang L., J.G. Hawkins and L.C. Lee (1990). On the generation of the pulsating aurora by the loss cone driven whistler instability in the equatorial region, *J. Geophys. Res.* **95**, 3893–3906.
- Hultqvist B. (1965). On the amplification of ELF emissions by charged particles in the exosphere, with special reference to the frequency band around the proton cyclotron frequency, *Planet. Space Sci.* **13**, 391–401.
- Hultqvist B. (1973). Auroral particles, *Cosmical Geophysics* eds. A. Egeland, Ø. Holter and A. Omholt, Universitetsforlaget, Copenhagen, Denmark, 161–179.
- Inan U.S. and T.F. Bell (1977). The plasmapause as a VLF wave guide, *J. Geophys. Res.* **82**, 2819–2827.
- Jacobs J.A. and K. Sinno (1960). World-wide characteristics of geomagnetic micropulsations, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **3**, 333–353.
- Jørgensen T.S. (1966). Morphology of VLF hiss zones and their correlation with particle precipitation events, *J. Geophys. Res.* **71**, 1367–1375.
- Jørgensen T.S. and E. Ungstrup (1962). Direct observation of correlation between aurorae and hiss in Greenland, *Nature* **194**, 462–463.
- Kaila K. and P. Tanskanen (1988). An auroral TV-system, *Report No. 115*, Univ. of Oulu, Dept. of Physics, p. 36.
- Kangas J., A. Aikio and J.V. Olson (1984). Multistation correlation of ULF pulsation spectra associated with sudden impulses, *Planet. Space Sci.* **34**, 543–553.
- Kennel C.F. and H.E. Petschek (1966). A limit on stably trapped particle flux, *J. Geophys. Res.* **71**, 1–28.
- Kimura I. (1961). Amplification of the VLF electromagnetic wave by a proton beam through the exosphere—An origin of the VLF emissions—, *Rep. Ionosph. Space Res. Japan* **15**, 171–191.
- Kimura I. (1967). On observations and theories of the VLF emissions, *Planet. Space Sci.* **15**, 1427–1462.

- Kimura I. (1989). Ray paths of electromagnetic and electrostatic waves in the Earth and planetary magnetospheres, in *Plasma Waves and Instabilities at Comets and in Magnetospheres*, edited by B.T. Tsurutani and H. Oya, pp. 161–171, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol 53, AGU, Washington, D.C.
- Kozyra J.U., C.E. Rasmussen, R.H. Miller and L.R. Lyons (1994). Interaction of ring current and radiation belt protons with ducted plasmaspheric hiss 1. Diffusion coefficients and timescales, *J. Geophys. Res.* **99**, 4069–4084.
- Kurth W.S., M.M. Baumback, and D.A. Gurnett (1975). Direction-finding measurements of auroral kilometric radiation, *J. Geophys. Res.* **80**, 2764–2770.
- Laaspere T., M.G. Morgan, and W.C. Johnson (1964). Chorus, hiss and other audio-frequency emissions at stations of the Whistler-East network, *Proc. IEEE* **52**, 1331–1349.
- Laaspere T., M.G. Morgan, and W.C. Johnson (1969). Observations of lower hybrid resonance phenomena on the OGO 2 spacecraft, *J. Geophys. Res.* **74**, 141–152.
- Laaspere T. and W.C. Johnson (1973). Additional results from an OGO 6 experiment concerning ionospheric electric and electromagnetic fields in the range 20 Hz to 540 kHz, *J. Geophys. Res.* **78**, 2926–2944.
- Liemohn H.B. (1965). Radiation from electrons in magnetoplasma, *Radio Sci.* **69D**, 741–766.
- Liemohn H.B. (1967). Cyclotron-resonance amplification of VLF and ULF whistlers. *J. Geophys. Res.* **72**, 39–55.
- Lyons L.R. and D.J. Williams (1984). *Quantitative Aspects of Magnetospheric Physics*, Geophysics and Astrophysics Monographs, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 231 p.
- MacArthur J.W. (1959). Theory of the origin of very low frequency radio emissions from the Earth's exosphere, *Phys. Rev. Lett.* **2**, 491–492.
- Manninen J.K. (1991). *Magnetofäärin vihellysilmio*, Pro-Gradu-tutkielma, Fysiikan laitos, Oulun yliopisto, 81s.
- Manninen J., T. Turunen ja J. Kultima (1991). Havainto revontulialueen VLF-taajuisen suhinan äkillisestä muutoksesta SSC-ilmiön yhteydessä, *XV Geofysiikan Päivät Oulussa 14.-15.5.1991*, toimittanut Hannu Kananen, 143–146.
- Manninen J.K. and T. Turunen (1993). On the relative motions of whistler channels and auroral forms during an auroral substorm, *Proceedings of The 19th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods at Kiruna August 9-14, 1992*, edited by Åke Steen, 141–146.
- Manninen J., T. Turunen and K. Kaila (1993). Magnetic pulsations during a pulsating auroral arc - evidence of one-to-one correlation. *Proceedings of The 19th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods at Kiruna August 9-14, 1992*, edited

by Åke Steen, 196-201.

- Manninen J., T. Turunen, A. Lubchich, E. Titova and T. Yahnina (1995). Relations of VLF emissions to impulsive electron precipitation measured by EISCAT radar in the morning sector of auroral oval *J. Atmos. Terr. Phys.* (in press).
- Manninen J., T. Turunen, J. Kultima and E. Titova (1994). Correlating optical emissions, quasi-periodic VLF emissions and magnetic Pc3 pulsations. *Geomagnetism and Aeronomy* (in press).
- Martin L.H., R.A. Helliwell and K.A. Marks (1960). Association between aurorae and very low-frequency hiss observed at Byrd station, Antarctica, *Nature, Lond.* **187**, 751-753.
- Morozumi H.M. (1963). Semi-diurnal auroral peak and VLF emissions observed at the South Pole, 1960 *Eos Trans AGU*, **44**, 798.
- Morozumi H.M. (1965). Enhancement of VLF chorus and ULF at the time of SC, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **19**, 371-374.
- Morozumi H.M. (1966). Sudden decrease of VLF chorus intensity at the time of SC and SI, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **20**, 326-328.
- Morozumi H.M. (1967). Examples of positive correlation between VLF chorus and CNA, *Planet. Space Sci.*, **15**, 207-208.
- Morozumi H.M. and R.A. Helliwell (1966). A correlating study of the diurnal variation of upper atmospheric phenomena in the southern auroral zone, *Rep. No. SEL-66-124*, Radio-science Lab., Stanford Electric Lab., Stanford Univ., Stanford, Calif.
- Murcray W.B. and J.H. Pope (1960). Radiation from protons of auroral energy in the vicinity of the Earth, *J. Geophys. Res.* **65**, 3569-3574.
- Mursu J. (1991). *VLF- ja VLF-R-mittaukset käyttäen siirrettävää VLF-lähettintä*, Syventävien opintojen tutkielma, Geofysiikan laitos, Oulun yliopisto, 97s.
- Mursula K., J. Kangas, T. Pikkarainen and M. Kivinen (1991). Pc 1 micropulsations at a high-latitude station: A study over nearly four solar cycles, *J. Geophys. Res.* **96**, 17651-17661.
- Mursula K., J. Kangas and T. Pikkarainen (1994). Properties of structured and unstructured Pc 1 pulsations at high-latitudes: Variation over the 21st solar cycle, *Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves* eds. M.J. Engebretson, K. Takahashi and M. Scholer, Geophysical Monograph 81, AGU, USA, 409-415.
- Muzzio J.L.R. and J.J. Angerami (1972). OGO 4 observations of Extremely Low Frequency hiss, *J. Geophys. Res.* **77**, 1157-1173.
- Neufeld J. (1963). Plasma-beam instability in the Hartree-Appleton approximation, *Phys. Fluids* **6**, 1750-1756.

- Neufeld J. and H. Wright (1963). Instabilities in a plasma-beam system immersed in a magnetic field, *Phys. Rev.* **129**, 1489–1507.
- Neufeld J. and H. Wright (1964). Multiple instability in a plasma-beam system, *Phys. Fluids* **7**, 1527–1534.
- Neufeld J. and H. Wright (1965). Instabilities produced in a stationary plasma by an "almost circular" electron beam, *Phys. Rev.* **137A**, 1076–1083.
- Nishida A. (1978). *Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere*, Springer-Verlag New York Inc., New York, USA, p 256.
- Nishida A. and L.J. Cahill, Jr. (1964). Sudden impulses in the magnetosphere observed by Explorer 12, *J. Geophys. Res.* **69**, 2243–2255.
- Obayashi T. (1965). Hydromagnetic whistlers, *J. Geophys. Res.* **70**, 1069–1078.
- Obertz P. and O.M. Raspopov (1968). Study of the spatial characteristics of type Pc5 geomagnetic pulsations, *Geomagn. Aeron.* **8**, 424–427.
- Oikarinen A. (1993). *Luonnon VLF-emissiot ja niiden käyttö magnetosfäärin tutkimisessa*, Syventävien opintojen tutkielma, Geofysiikan laitos, Oulun yliopisto, 104s.
- Oliven M.N. and D.A. Gurnett (1968). Microburst phenomena, 3, an association between microbursts and VLF chorus, *J. Geophys. Res.* **73**, 2355–2362.
- Ondoh T. (1961). On the origin of VLF noise in the Earth's exosphere, *J. Geomagn. Geoelect. Kyoto* **12**, 77–83.
- Ondoh T. (1963). The ionospheric absorption of the VLF emissions at the auroral zone, *J. Geomagn. Geoelect. Kyoto* **15**, 90–108.
- Park C.G. (1977). VLF wave activity during a magnetic storm: A case study of the role of power line radiation, *J. Geophys. Res.* **82**, 3251–3260.
- Park C.G. (1982). Whistlers, *CRC Handbook of Atmospheric Vol II* (ed. Hans Volland), CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 21–77.
- Park C.G., R.A. Helliwell and F. Lefevre (1983). Ground observations of power line radiation coupled to the ionosphere and magnetosphere, *Space Sci. Rev.* **35**, 131–137.
- Parrot M. (1994). Observations of power line harmonic radiation by the low-altitude AUREOL 3 satellite, *J. Geophys. Res.* **99**, 3961–3969.
- Perona G.E. (1972). Theory on the precipitation of magnetospheric electrons at the time of a sudden commencement, *J. Geophys. Res.* **77**, 101–111.
- Ratcliffe J.A. (1959). *The Magneto-ionic Theory and its Applications to the Ionosphere*, Cambridge University Press.
- Ronnmark K. (1982). WHAMP-waves in homogeneous, anisotropic multicomponent plas-

mas, *Kiruna Geophys. Inst. Report No. 179*.

- Rycroft M.J. (1991). Interactions between whistler-mode waves and energetic electrons in the coupled system formed by the magnetosphere, ionosphere and atmosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.* **53**, 849–858.
- Saito T., F. Takahashi, A. Morioka and M. Kuwashima (1974). Fluctuation of electron precipitation to the dayside auroral zone modulated by compression and expansion of the magnetosphere, *Planet. Space Sci.* **22**, 939–953.
- Sato N. (1980). Quasi-periodic (QP) ELF-VLF emissions observed in high latitudes, *Mem. Natn. Inst. Polar Res., Ser. A17*, p. 120, Tokyo.
- Sato N., K. Hayashi, S. Kokubun, T. Oguti and H. Fukunishi (1974). Relationships between quasi-periodic VLF emission and geomagnetic pulsation, *J. Atmos. Terr. Phys.* **36**, 1515–1526.
- Sato N. and S. Kokubun (1980). Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Quasi-periodic ELF-VLF emissions associated with Pc 3-4 magnetic pulsations and their geomagnetic conjugacy, *J. Geophys. Res.* **85**, 101–113.
- Sato N. and H. Fukunishi (1981). Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Classification of quasi-periodic ELF-VLF emissions based on frequency time spectra, *J. Geophys. Res.* **86**, 19–29.
- Sato N. and S. Kokubun (1981). Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Regular period ELF-VLF pulsations and their geomagnetic conjugacy, *J. Geophys. Res.* **86**, 9–18.
- Sato N., H. Suzuki, K. Maezawa and T. Saemundsson (1990). Conjugacy of daytime ELF-VLF emission activities in the auroral zones, *J. Geophys. Res.* **95**, 7847–7856.
- Sazhin S.S. (1993). *Whistler-mode Waves in a Hot Plasma*, Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, 259 p.
- Sazhin S.S. and M. Hayakawa (1994). Periodic and quasiperiodic VLF emissions (Review paper), *J. Atmos. Terr. Phys.* **56**, 735–753.
- Sazhin S.S., K. Bullough and M. Hayakawa (1993). Auroral hiss: a review, *Planet. Space Sci.* **56**, 735–753.
- Sazhin S.S., A.E. Sumner and N.M. Temme (1992). Relativistic and nonrelativistic analysis of whistler-mode waves in a hot anisotropic plasma, *J. Plasma Phys.* **47**, 163–174.
- Scarabucci R.R. (1969). Interpretation of VLF signals observed on the OGO-4 satellite, *Tech Rep. 3418-2*, Radiosci. Lab., Stanford Univ., Stanford, California.
- Sonwalkar V.S. and U.S. Inan (1989). Lightning as an embryonic source of VLF hiss, *J. Geophys. Res.* **94**, 6986–6994.

- Sonwalkar V.S. and U.S. Inan (1988). Wave normal direction and spectral properties of whistler mode hiss observed on the DE 1 satellite, *J. Geophys. Res.* **93**, 7493–7514.
- Space Sci. Rev.* (1983) **vol 35** numerot 1 ja 2 kokonaan.
- Stone R.G. (1973). Radio physics of the outer solar system, *Space Sci. Rev.* **14**, 534–551.
- Storey R.L.O. (1953). An investigation of whistling atmospherics, *Phil. Trans. R. Soc., London A* **246**, 113–141.
- Tarcsai Gy. (1975). Routine whistler analysis by means of accurate curve fitting, *J. Atmos. Terr. Phys.* **37**, 1447–1457.
- Tatnall A.R.L., J.P. Matthews, K. Bullough and T. Kaiser (1978). *Power-Line Harmonic Radiation and the Electron Slot*, Sci. Rep. 1978 No 1, University of Sheffield, Space Physics Group.
- Thorne R.M., E.J. Smith, R.K. Burton and R.E. Holzer (1973). Plasmapheric hiss, *J. Geophys. Res.* **78**, 1581–1596.
- Tomizawa I and T. Yoshino (1984). Power line radiation over Northern Europe observed on balloon B₁₅-1N, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **31**, 115–123.
- Tomizawa I and T. Yoshino (1985). Power line radiation observed by the satellite "OHZORA", *J. Geomagn. Geoelectr.*, **37**, 309–327.
- Troiskaya V.A., T.A. Plyasova-Bakunina and A.V. Gulelmi (1971). Relationship between Pc2–4 pulsations and the interplanetary magnetic field, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **197**, 1312–1314.
- Troiskaya V.A., A.V. Gulelmi, O.V. Bolshakova, E.T. Matveyeva and R.V. Schepetnov (1972). Indices of geomagnetic pulsations, *Planet. Space Sci.*, **20**, 849–858.
- Turunen T. (1989). Aktivnyij-projekti, 1–20.
- Turunen T., P.S. Cannon and M.J. Rycroft (1980). ELF radio signals in the auroral ionosphere generated by non-linear demodulation of LF and/or MF transmission, *Nature*, **286**, 375–377.
- Wong H.K. and M.L. Goldstein (1988). Proton beam generation of oblique whistler waves, *J. Geophys. Res.* **93**, 4110–4114.
- Yachmenev I.V., V.A. Mullayarov and N.G. Kleymenova (1989). The effect of solar wind shock waves in VLF emission, *Geomag. Aeron.*, (Engl. transl.) **29**, 895–896.
- Yahnin A., E. Titova, A. Lubchich, T. Bösinger, J. Manninen, T. Turunen, T. Hansen, O. Troshichev and A. Kotikov (1995). Dayside high latitude magnetic impulsive events: Their characteristics and relationship to sudden impulses, *J. Atmos. Terr. Phys.* (in press).

- Yamagishi H. (1989). ELF emission in high latitudes – Ray path calculation and ground-satellite observations, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Jpn., Ser. A*, **19**, 1–120.
- Yoshida S. and T. Hatanaka (1962a). The disturbances of exosphere as seen from the VLF emission, *J. Phys. Soc. Japan* **17**, 78–83.
- Yoshida S. and T. Hatanaka (1962b). Variations in the VLF emissions with reference to the exosphere, *Rep. Ionos. Space Res. Japan* **16**, 387–409.

Lisäksi työssä on viittauksien julkaisemattomaan käsitteilyseen:

Goncharova M., J. Manninen, A. Oikarinen, J. Kangas and T. Turunen, High-latitude ($L=6.1$) observations of VLF chorus and hiss emission bursts triggered by obliquely propagating whistlers. *Will be submitted in J. Atmos. Terr. Phys.*