

Tapio J. Tuomi

Ukkonen ja salammat



Tähtitieteellinen yhdistys Ursa

Huomautus pdf-versioon

Tämä kirja julkaistiin vuonna 1993. Vuonna 2008 suurin osa sen sisältämästä tiedosta on edelleen voimassa, mutta varsinkin salamanpaikannustekniikan kehityksen takia käsitys Suomen ukkosten voimakkuudesta (salamamääristä) on muuttunut täysin. Siksi tästä uudelleenjulkaisusta on jätetty pois liitteet E ja F. Vanhentunutta tietoa jää tosin alalukuihin 5.3 ja 5.4, mutta niiden poistaminen ei käy yhtä luontevasti. Lisäksi mustavalkoinen valokuvaliite (sivut 33-40) on jätetty pois, koska tietoverkossa on nykyään tarjolla salamakuvia yllin kyllin.

Helsingissä lokakuussa 2008
Tapio J. Tuomi

Ukkonen
ja salammat

Ursan julkaisuja

1. Tähtitiedettä harrastajille,
E. ja I. Bonsdorff ym., 1926
2. Tähtitiedettä harrastajille II,
I. Bonsdorff ym., 1938
3. Tähtitieteen harrastajan kirja,
P. Kalaja - U. Kuuskoski (toim.), 1947
4. Tähtitiedettä harrastajille III,
H. Alfvén ym., 1954
5. Tähtitiedettä harrastajille IV,
B. Hielm ym., 1965
6. Teemme peilikaukoputken,
J. M. Heikinheimo, 1966
7. Tähtien ja galaksien maailma,
T. Markkanen - S. Linnaluoto
(toim.), 1975
8. Mustaa aukkoa etsimässä,
R. Keskinen - H. Oja, 1977
9. Tulipalloja taivaalla,
H. Oja, 1978
10. 1982 kun planeetat kohtaavat,
A. Jännes - H. Oja, 1978
11. Albert Einstein - tutkija ja ihminen,
H. Oja - O. Vilhu (toim.), 1979
12. Tähtitaivaan opas,
K. Kaila, 1979
13. Auringosta äärettömyyteen,
K. J. Donner ym., 1979
14. Ufojen arvoitus,
J. Kyröläinen - P. Teerikorpi, 1980
15. Maailmankaikkeutta tutkimassa,
M. Valtonen, 1981
16. Planeetat,
H. Oja - M. Poutanen, 1982
17. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 1,
K. Kaila - M. Lindqvist -
H. Määttänen (toim.), 1982
18. Teemme aurinkokellon,
A. Koivusalo, 1982
19. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 2,
K. Kaila - H. Määttänen (toim.), 1983
20. Uusia ikkunoita maailman-
kaikkeuteen,
K. Mattila - H. Oja (toim.), 1983
21. Tähtitieteen perusteet,
H. Karttunen - P. Kröger - H. Oja -
M. Poutanen (toim.), 1984
22. Komeetat,
K. Kaila - H. Oja - M. Valtonen -
T. Korhonen, 1983
23. Tähtitaivaan arvoituksia,
R. Anttila ym., 1984
24. Suomi avaruudesta,
M. Punkari (toim.), 1984
25. Maapallo ja avaruus,
M. Valtonen - H. Oja (toim.), 1985
26. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 3,
K. Kaila - H. Määttänen (toim.), 1985
27. Kaukoputken rakentajan käsikirja,
J. Turunen, 1985
28. Värity tuhat vuotta Halley'n pyrstötähteä,
L. Kröger - H. Oja, 1986
29. Antti katsoo tähtiä,
L. Kröger - H. Oja, 1986
30. Avaruuden saaret,
J. Westman, 1986
31. Nainen ja maailmankaikkeus,
E. Isaksson, 1987
32. Maiseman valot ja värit,
M. Minnaert, 1987
33. Tähtitieteen harjoitustehtäviä,
H. Karttunen - P. Kröger -
M. Poutanen, 1987
34. Isaac Newton - jättiläisen hartioilla,
R. Lehti - T. Markkanen -
J. Rydman (toim.), 1988
35. Kosmos - maailmamme muuttuva kuva,
P. Teerikorpi - M. Valtonen, 1988
36. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 4,
V. Mäkelä (toim.), 1988
37. Atomien haamu,
P.C.W. Davies - J.R. Brown
(toim.), 1989
38. Paholaisen asianajaja
- opaskirja skeptikolle,
H. Häyry - H. Karttunen -
M. Virtanen (toim.), 1989
39. Antti katsoo kuuta,
J. Nykänen - H. Oja, 1989
40. Auringonpimennykset,
J. Kakkuri - H. Oja - R. Anttila, 1989
41. Aurinkokuntamme,
H. Oja - M. Poutanen, 1990
42. Planeetta Maa,
J. Kakkuri, 1991
43. Jääkausien jäljellä,
M. Eronen, 1991
44. Räjähävä maailmankaikkeus,
M. Longair, 1992
45. Kvasaareja ja mustia aukkoja,
M. Valtonen, 1992
46. Ukkonen ja salammat,
T. Tuomi, 1993

Ursan julkaisuja 46

Tapio J. Tuomi

Ukkonen ja salammat

Tähtitieteellinen yhdistys Ursa
Helsinki 1993

*Kirjan tekstin ja piirrosten copyright
Ilmatieteen laitos ja Tapio J. Tuomi*

*Kirjan kuvien copyright kuvaajat ja
Tähtitieteellinen yhdistys Ursa
Laivanvarustajankatu 9 C, 00140 Helsinki,
puh. 90 - 174 048, faksi 90 - 657 728*

*Tekstiosuuden tulostus tekijä
Valokuvaliitteen taitto Arja Latvala*

*Paino RT-Paino
Pieksämäki 1993*

*ISSN 0357-7937
ISBN 951-9269-65-7*

Esipuhe

Suomi on pohjoisesta sijainnistaan huolimatta maa, jossa lumisen talven ohella koetaan enemmän tai vähemmän lämmin kesä — Golf-virran ilmastovaikutuksen ansiosta sää voi muistuttaa jopa Keski-Euroopan olosuhteita. Ukkonen, joka tyypillisimmillään on kuuman ja kostean tropiikin ilmiö, esiintyy meilläkin kesäisin vaikuttavana ja usein tuhoisana luonnonvoimien näytelmänä.

Työskentelyni Ilmatieteen laitoksella mm. salamoiden havainnoinnin ja muun ilmamekaniikan sähköisyyteen liittyvän tutkimuksen parissa on tuonut esiin suomalaisen — niin yleisön kuin esimerkiksi tele- ja sähköyhtiöidenkin — suuren kiinnostuksen ukkosta kohtaan. Vaikka Ilmatieteen laitos julkaisee vuosittain salama-havaintojen tulokset ja tietoa levitetään mm. tiedotusvälineiden haastatteluissa joka kesä, on ukkosia käsittelevän suomenkielisen perustietolähteen tarve tullut ilmeiseksi. Siksi olen tuntenut velvollisuudekseni yrittää paikata aukkoa pienen kirjan laajuisella tietopakettilla.

Jotta tämä kirja palvelisi mahdollisimman laajaa lukijakuntaa, on esitystavassa lomitettuna kolme erilaista tasoa. **Perusteksti, kirjan runko, on laadittu ensimmäiseen havainnolliseksi ja yleistajuiseksi.** Erikoisesti henkilökohtaiset suojautumisohjeet on tarkoitettu kaikille lukijoille. Toinen taso koostuu tekstin sekaan sijoitetuista kappaleista, joissa on tarkempaa ja yksityiskohtaisempaa, usein kuvaavilla lukuarvoilla ja yksinkertaisilla kaavoilla tuettua tietoa. Selkeyden vuoksi ne on erotettu perustekstistä omiin "lokeroihinsa". Enemmän matematiikkaa ja fysiikkaa sisältävät tai muuten peruslinjasta poikkeavat asiat esitetään kirjan lopussa liitteinä. Liitteet eivät ole kuitenkaan pelkkiä lisäkkeitä, vaan ne on tarkoitettu kirjan olennaiseksi osaksi mm. sellaisille lukijoille, joilla on jonkin verran fysiikan tuntemusta ja tarvetta syvempään tietoon. Liitteiksi on sijoitettu myös sellaisia koottuja ukkostietoja, jotka laajuutensa takia katkaisisivat perustekstin kulun. Erilinen valokuvaliite on kuitenkin kirjan alkupuolella.

Ukkosessa ovat eri tieteenaloista vahvimmin esillä meteorologia ja sähkömagnetismi. Ukkoseen liittyvien säätekijöiden kuvailu jätetään tässä kirjassa silti melko pintapuoliseksi ja esillä on selvemmin fyysikon näkökulma. Lisätietoa kaipaavalle lukijalle on saatavilla suomeksi hyviä meteorologian kirjoja. Sähkömag-

netismin osalta käytetään myös matemaattista esitystä, jonka avulla varsinkin liitteissä selvitetään teoreettisia kysymyksiä; kaavoihin perehtyminen ei kuitenkaan ole edellytyksenä kirjan muun sisällön ymmärtämiselle. Tekniset suojausta käsittelevät asiat on jätetty erittäin vähälle huomiolle, sillä ne muodostavat oman, laajaa erikoisasantuntemusta vaativan alansa.

Monilla meistä lienee omakohtaisia kertomisen arvoisia kokemuksia salamasta, ja epätavallisemmistakin salaman tihutöistä tulee usein uutisia maailmalta. Vaikka erilaisten tapausten kuvaukset varmasti valottavat osaltaan ukonilman ja salamoiden luonnetta, tätä sinänsä kiinnostavaa aluetta käsitellään tässä kirjassa vain muutamien esimerkein, jotka on koottu omaksi liitteekseen. Tarkoitus on ensisijaisesti antaa fysikaalista pohjaa omien havaintojen ymmärtämiselle ja selvittää peruskäsitteitä lähtökohdaksi niille, jotka haluavat etsiä lisää tietoa. Havaintomenetelmien muuttumisen takia ei ole pyritty laatimaan Suomen ukonilmoista täydellistä pitkäaikaista tilastoa, vaan pääpaino on muutamien viime vuosien tuloksilla.

Kirjan lopussa on yksityiskohtainen hakemisto, joka palvelee teoksen satunnaiskäyttöä ja käyttöä käsikirjana. Se on laadittu valikoivasti niin, että viittaus sisältää tietoa ko. asiasta (tai laajemman kokonaisuuden alkukohtaa) eikä koske pelkkää sanan satunnaista esiintymistä. Kirjallisuusviitteiden käyttö, varsinkin perustekstissä, on rajoitettu vain kaikkein tärkeimpiin lähteisiin, koska tämä kirja ei ole varsinainen tutkimus. Viittaustapa on sama kuin tieteellisessä kirjallisuudessa ja perustuu kirjoittajan nimeen ja vuosilukuun, esim. Krider & al. (1976) (al. = alii tarkoittaa *muut*). Toimitettujen kirjojen osalta mainitaan artikkelin kirjoittaja ja viitataan toimittajaan, esim. Ogawa, ks. Golde (1977).

Tieteen pääkieli on englanti, ja tälläkin alalla suomenkielinen erikoissanasto (terminologia) laahaa jäljessä. Olen pyrkinyt mahdollisimman huolelliseen olemassa olevien suomalaisten termien käyttöön tai havainnollisuuteen uusien sanojen keksimisessä. Niille, jotka haluavat perehtyä englanninkieliseen aineistoon, on evääksi laadittu suppea englantilais-suomalainen sanasto.

Haluan kiittää tämän kirjan synnystä erikoisesti Ilmatieteen laitosta, jonka inspiroivassa työilmapiirissä kipinä tähän työhön on saanut alkunsa ja joka ystävällisesti on antanut luvan havainto- ym. materiaalin käyttöön. Olen myös kiitollinen fil. tri Risto Pirjolalle, fil. kand. Pekka Janhuselle ja meteorologi Tapani Peltoselle sekä kahdelle Ursan jäsenelle, Olli Mannerille ja Veikko Mäkelälle, jotka ovat lukeneet kirjan luonnoksen ja tehneet arvokkaita huomautuksia.

Vantaalla 1.2.1993

Tapio J. Tuomi

Sisällys

1	Johdanto	9
2	Ukonilma ja sää	11
2.1	Edellytykset ukonilman synnylle	11
2.2	Ilmamassaukkonen	12
2.3	Rintamaukkonen	14
2.4	Ukkosen ennustaminen	15
3	Ukkospilvi	16
3.1	Ukkospilven kehityskaari ja sähköinen rakenne	16
3.2	Ukkospilven ilmavirtaukset	20
3.3	Ukkospilven varautuminen	20
Lokero 3.1	Jään rakenteesta	22
4	Salama	24
4.1	Ukkospilven sähköpotentiaali	24
4.2	Negatiivinen maasalama	26
Lokero 4.1	Iskeekö salama alas vai ylös?	28
4.3	Positiivinen maasalama	29
4.4	Pilvisalama ja ilmasalama	30
Lokero 4.2	Salaman värit	30
	Valokuvaliite	33
4.5	Salaman voimakkuus ja kerrannaisuus	41
4.6	Ukkosen jyrinä	41
Lokero 4.3	Salamaan liittyviä lukuarvoja	43
Lokero 4.4	Ukkospilven sähkötalous	44
5	Ukkosten esiintyminen Suomessa	46
5.1	Salamoiden havainnointi	46
Lokero 5.1	Salaman suuntiminen	49
Lokero 5.2	Aikaeroon perustuva salamanpaikannus	50
5.2	Ukkospäivät	51
5.3	Salamamäärät ja -tiheydet	53

5.4	Voimakkaat ukonilmat	55
5.5	Ukkoset muualla maapallolla	57
6	Salamavahingot ja suojautuminen	59
6.1	Mihin salama iskee?	59
6.2	Rakennusten suojaaminen	60
6.3	Tele- ja sähköverkkojen suojaaminen	61
6.4	Henkilökohtainen suojautuminen	62
Liite A	Ilmakehän rakenteesta ja dynamiikasta	66
A.1	Ilmakehän kerrokset	66
A.2	Ilmavirtaukset ja rintamat	68
Liite B	Ilmasähkövirtapiiri	71
B.1	Ilmasähkötutkimuksen historiaa	71
B.2	Kauniin ilman sähköisyys	72
B.3	Maanpinnan muodon vaikutus	74
B.4	Ukkospilven dipolimalli	75
B.5	Globaalinen sähkövirta	79
B.6	Ukkossolun varautumismalli	80
Liite C	Salamapurkauksen fysiikkaa	84
C.1	Katsaus eri purkauslajeihin	84
C.2	Pääsalaman virtamalli ja sähkömagneettinen kenttä	87
C.3	Salamoiden pulssimuoto	90
C.4	Radioukkoset	92
Liite D	Pallosalama	94
Liite E	Salamataulukko 1987-1992	96
Liite F	Voimakkaat ukkosjaksot 1987-1992	102
Liite G	Kuvauksia salamatuhoista	108
Liite H	Suureet ja mittayksiköt	114
Kirjallisuutta		116
Englantilais-suomalainen sanasto		119
Hakemisto		120

1 Johdanto

Jääkausien valtavien mullistusten jälkeen Suomen luonto on sekä geologisesti että ilmastollisesti pysynyt harvinaisen vakaana. Vuodenaikojen rytmi tuo meille vaihtelua, mutta harvoin maatumme koettelevat tuhoisat tulvat, myrskyt tai maanjäristykset. Ukkonenkaan ei meillä rajuudessaan tai runsaudessaan vedä vertoja lämpimien seutujen tulimyrskyille, mutta luonnonnäytelmiemme hieman harmaassa kirjossa se on kuitenkin herättänyt tavallista enemmän kiinnostusta.

Tuli on yksi ihmisen teknisen kulttuurin pitkäaikaisimpia peruselementtejä, eikä sen merkitystä henkisenkään sivistyksen osana voi väheksyä. Kalevalassa sen maaginen voima tulee korostetusti esiin, sillä sehän saa alkunsa suoraan jumalilta ukonilman kautta. Tässä ovat tulen syntysanat (47. runo, säkeet 67-70):

Tulta iski ilman Ukko,
valahutti valkeata,
miekalla tuliterällä,
säilällä säkenevällä,
———

Ukkosen suuri mytologinen merkitys sekä sen suora yhteys tärkeään välineeseen, tuleen, todistavat suomalaisten kuten muidenkin kansojen laajasta vuosituhantiseen kiinnostuksesta sitä kohtaan. Siksi tuntuu ehkä oudolta, että Suomessa on julkaistu vain vähän ukkosta käsittelevää yleisölle suunnattua kirjallisuutta, lukuun ottamatta lyhyitä katsauksia (esim. Ukonilmat Suomessa 1887-1906; Oksanen, 1940). Sen sijaan uutta tieteellistä tietoa on nykyään paljon, varsinkin englannin kielellä, ja ongelmana on lähinnä suodattaa siitä esiin olennaisin ja havainnollisin. Tietenkin jää myös jäljelle epäselviä kysymyksiä, joiden osalta tieto on parhaimmillaan suuntaa-antavaa.

Vaikka ukkonen on korostetusti sähköilmiö, se saa voimansa ilmakehän lämpö- ja kosteusoloihin liittyvistä tapahtumista. Luvussa 2 luodaan katsaus ilmakehän alaosien rakenteeseen ja siihen, millaisissa tilanteissa ukkospilvet voivat syntyä sekä miten erityyppiset ukonilmat liittyvät eri säätiloihin. Taustatietoa ilmakehän

rakenteesta on liitteessä A.

Ukkospilven kykyä varautua sähköisesti tarkastellaan luvussa 3. Ukkospilvet toimivat myös maapallonlaajuisen ilmasähkövirtapiirin generaattorina; tätä kuvataan liitteessä B, jossa avataan myös laajempi perspektiivi ilmakehän sähköilmiöihin yleensä. Ukkospilven varauksen purkautumista erilaisina salamoina käsitellään luvussa 4. Tarkempi fysikaalinen kuvaus itse purkaustapahtumasta on liitteessä C, ja ongelmallisen pallosalaman tarkastelu on jätetty kokonaan perustekstin ulkopuolelle liitteeseen D.

Ukkosen esiintymistä nimenomaan Suomen oloissa käsitellään luvussa 5. Siinä kuvataan myös, miten salamoita havainnoidaan ja millaisiin tuloksiin on päästy Suomen ukkosilmaston määrittämisessä. Suppea katsaus luodaan myös ukkosiin muualla maapallolla.

Luku 6 käsittelee salamoiden aiheuttamia vahinkoja ja erikoisesti sitä, miten toisaalta ihmisiä, toisaalta rakennuksia ja sähkölaitteita tulisi suojata.

Liitteeseen E on koottu keskiarvotiedot paikannetuista salamoista ja vastaavista ukkospäivistä (Suomen eteläpuoliskossa) vuosina 1987-1992. Liitteessä F näkyvät näiden vuosien kovimpien ukkosjaksojen paikannetut salamat.

Liitteessä G on valikoima kuvauksia ukonilmojen vahingoista lähinnä lehtiutisten perusteella. Ne elävöittävät kirjan perustekstin antamaa "teoreettista" kuvaa ja tarjoavat eräissä tapauksissa varoittavia esimerkkejä salaman vaaroista.

Liite H sisältää luettelon tärkeimmistä tässä kirjassa esiintyvistä fysikaalisista suureista ja niiden mittayksiköistä.

Sivuilla 33-40 on valokuvaliite, joka selventää monia tekstissä mainittuja salaman ominaisuuksia.

Edellä luetut tulien syntysanat varmaan herättivät kysymyksen, mitkä ovat salaman syntysanat. Vaikkapa tällaiset:

Ilma lieto ylös kiihti,
pilvikummun esiin loihti.
Tuulen nosti, sateen kaati,
sähkösäilän siitä laati.

Seuraavassa tarkastelemme, mistä oikeastaan on kysymys.

2 Ukonilma ja sää

Ilmakehä on kaasukerros, johon Auringon säteily syöttää energiaa pitäen sitä jatkuvassa levottomassa liikkeessä. Sen alimmassa osassa, troposfäärissä, koemme nämä vaihtelut sääinä, joka pahimmillaan voi yltyä ukkosmyrskyksi. Liitteessä A on perustietoa ilmakehän rakenteesta. Ukkosen kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat troposfäärin lämpötilan jakautuminen pystysuunnassa, ilman kosteus ja rintamien muodostuminen.

2.1 Edellytykset ukonilman synnylle

Ilmakehän alimmalle kerrokselle, *troposfäärille*, on luonteenomaista jyrkkä lämpötilan aleneminen korkeuden kasvaessa (aina tropopausiin, 10 km:iin asti Suomen leveysasteilla). Alenemisnopeus on keskimäärin $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, jolloin ilman tasapainotila pystysuunnassa on vakaa (stabiili), ts. pystyvirtaukset ovat heikkoja. Kun lämpötilan aleneminen vielä jyrkkenee tarpeeksi, tulee lämpötilajakautumasta epävakaa (labiili) ja aiheuttaa voimakkaita pystyvirtauksia eli *konvektiota*.

Konvektiotalanteessa maanpintaa lähinnä oleva ilma alkaa nousta joistakin kohdista ja painuu alas niiden ympäristössä. Pystyvirtausaluetta, jonka keskellä virtaus käy ylöspäin, sanotaan *konvektiosoluksi*. Tapahtuma on samantapainen kuin kuplien muodostuminen kiehuvaan nesteeseen. Solun paikan ja koon osoittaa selvästi kohoavasta kosteasta ilmasta muodostuva kumpu- tai kuuropilvi. Jos ilman tasapainotila on epävakaa paksussa kerroksessa, konvektiosolu kehittyä ja pilvi kasvaa korkeutta. Samalla solun pinta-alakin kasvaa, ja lopulta kypsän ukkossolun halkaisija on muutaman kilometrin luokkaa. (Nimityksillä ukkossolu ja ukkospilvi tarkoitetaan tässä suunnilleen samaa asiaa.) Sen syntypaikan valintaan vaikuttavat satunnaistekijät, mutta myös maastolla on siihen osuutta. Jos Auringon säteily on voimakasta, korkeat kuivat harjualueet laukaisevat konvektion helpoimmin. Suuret yhtenäiset ukkosalueet, joiden halkaisija on 40-50 km:n luokkaa, koostuvat useasta vierekkäisestä, toisistaan vaikeasti erotettavasta ukkossolusta (luku 5).

Jos kohoavassa ilmvirrassa on tarpeeksi kosteutta, tyypillisesti 5-10 g/m³ (vielä runsaampi kosteus, jota voi esiintyä helteellä, tuntuu hiostavalta), on kuuro- ja ukkospilvien kehittyminen mahdollista. Vesihöyry tiivistyy pieniksi vesipisariksi saapuessaan ns. tiivistymiskorkeudelle, joka on yhden kilometrin luokkaa. Pisarat muodostavat kasvavan kumpupilven, jonka alareuna jää tälle korkeudelle. Tiivistyessään vesihöyry luovuttaa lämpöä hidastaen nousevan ilman jäähtymistä, mikä kiihdyttää pystyvirtausta.

Kumpupilvivaiheen jälkeen voimistunut konvektio kasvattaa pilven yläosan korkeuteen, jossa lämpötila on pakkasen puolella. Kun pilven huippu ylittää tason, jossa lämpötila on -20°C paikkeilla, huippuun alkaa ilmaantua vesipisaroiden sijaan pieniä jääkiteitä, mikä nähdään kukkakaalimuodon muuttumisena huntumaiseksi. Tässä vaiheessa havaitaan sadetta pilven alapuolella: kumpupilvi on kasvanut *kuurolpilveksi*, joka tuottaa sateita, usein rankkoja, vetenä, räntänä, lumena tai rakeina.

Kuurolpilvessä tapahtuu sähkön erottumista, varautumista, jota käsitellään luvussa 3. Edullisissa olosuhteissa varautuminen on niin voimakasta, että se purkautuu salamoina, jolloin kuurolpilvi on muuttunut *ukkospilveksi*; kummastakin vaiheesta käytetään samaa nimitystä *cumulonimbus*. Ukkospilven huippu ulottuu usein tropopausiin asti, Suomen leveysasteilla suunnilleen kymmenen kilometrin korkeuteen, jossa voidaan saavuttaa jopa -50...-60°C kylmyys. Pilven yläosan jääkidehuntu leviää vaakasuoraan tunnusomaiseksi *alasimeksi*.

Ilman tasapainotilan muuttuminen epävakaaaksi voi tapahtua eri tavoilla, joiden mukaan ukonilmat jaetaan eri tyyppisiin. Suomen oloissa tulevat kyseeseen ilmassaukkonen ja rintamaukkonen. Nämä ukkoslajit eivät aina välttämättä esiinny puhtaina, vaan eri piirteitä voi olla sekoittuneina. Esimerkkejä havaituista ukkosista, tosin ilman yksityiskohtaista analyysiä niiden tyypeistä, on luvussa 5 ja liitteessä F.

2.2 Ilmassaukkonen

Toinen Suomessa esiintyvistä ukkoslajeista on *ilmassaukkonen*, johon Harjama (1955, 1986) mukaan voidaan lukea noin puolet tapauksista. Nimitys johtuu siitä, että laji esiintyy ilmassan sisällä eikä erilaisten ilmassojen rajalla kuten rintamaukkonen. Laji ei ole kuitenkaan yhtenäinen, vaan ilmassaukkosia voi syntyä eri syistä, vaikka pääedellytys, ilmassan riittävä kosteus, on niissä sama kuten myös rintamaukkosissa. Ilmassan historiasta ja ulkoisista olosuhteista riippuu, miten se tulee tarpeeksi epävakaaaksi konvektion muodostumiselle. Eteläisistä ilmansuunnista saapuvat, rintamien välisen ns. lämpimän sektorin (liite A) ilmassat ovat usein kosteita ja lämpimiä, kesällä jopa helteisiä ja hiostavia, ja

niille on ominaista samea auer, josta pilvet näyttävät kasvavan ilman selvää alareunaa. Rintamien pohjoispuolinen ilmassa on usein kylmää ja kuivaa, mutta se voi olla myös kostea, Atlantilta saapunutta, jolloin siinäkin voi syntyä ukkosia.

Epävakautta aiheuttaa ilman jäähtyminen ylhäällä tai lämpeneminen alhaalla. Konvektion voi saada siis laukeamaan ylätroposfääriin kylmän ilman korvautuminen vielä kylmemmällä, auringonsäteilyn lämmitys maanpinnassa tai ilman virtaaminen lämpimän maan- tai merenpinnan ylle. Myös orografia eli maaston korkeusvaihtelu voi vaikuttaa asiaan. Eri tapausten erottaminen ainakaan ilman meteorologista analyysiä ei ole aina mahdollista.

Lämpöukkosina voidaan pitää tapauksia, joissa kauniin ilman kumpupilvet selvästi auringonpaisteen vaikutuksesta kasvavat kuuro- ja ukkospilviksi. Meri-alueet ja niiden rannikot noin 20 km leveydeltä pysyvät tällöin selkeinä, samoin pilvet karttavat suurimpia järvenselkiämme. Harjama (1955, 1986) mukaan Suomen ukkosista vain 1-2 % on lämpöukkosia, mutta tropiikissa voimakas auringonpaiste aiheuttaa niitä paljon enemmän. Riippuvuus auringonpaisteesta merkitsee, että lämpöukkosia on eniten keskikesällä iltpäivisin. Suomen lämpöukkoset esiintyvät yleensä hajanaisesti eikä niiden salamointi ole kovin runsasta.

Lämpöukkosia muistuttavat loppukesän ja syksyn ukkoset, joissa viileään ilmaan verrattuna lämmin maanpinta tai varsinkin meri laukaisee konvektion. Nämä ukkoset ovat lämpöukkosten tapaan yleensä heikkoja ja hajanaisia, mutta esim. poikkeuksellisen lämpimän meren yllä ne voivat yltyä rajuksikin.

Muissa ilmassaukkosissa epävakauden aiheuttaa yleensä troposfääriin yläosan ilman kylmeneminen, ja ukkoset ovat laajempia ja rajumpia kuin lämpöukkoset eivätkä ole yhtä riippuvaisia vuoden- ja vuorokaudenajasta eivätkä maanpinnan laadusta. Ylätroposfääriin ilman ollessa tavallista kylmempää ovat näin varhaiskevään ja talviajankin ukkoset mahdollisia Suomessa, vaikka ne ovatkin harvinaisia ja hajanaisia.

Pisaraaukkoseksi Harjama (1955) nimittää tilannetta, jossa kooltaan rajoitettu (halkaisijaltaan alle 1000 km) kylmän ilman massa, *kylmä pisara*, kulkeutuu kostean pintailman yläpuolelle. Tätä kuvaa esimerkki ajalta 24.-25.9.1989 (ks. liite F). Koko Etelä- ja Keski-Suomessa oli kostea, kolea ja sumuinen syysää lämpötilan ollessa n. +10°C. Tällaisessa säässä ja tähän vuodenaikaan ei odottaisi ukkosta — eikä sitä osattukaan ennustaa. Perämeren kohdalle Ruotsin puolelle ilmaantui troposfääriin yläosaan kylmä pisara, jonka suuri ero pintailmaan verrattuna teki lämpötilajakautuman voimakkaasti epävakaaaksi. Pisara liukui yön kuluessa Perämereltä Suomen halki aina Laatokalle asti synnyttäen koko matkalla vuodenaikaan nähden runsaat ukkoset.

Ilmassaukkonen voi elinaikanaan, joka on normaalisti puolesta tunnista tuntiin, pysyä melkein paikallaan. Se voi myös edetä ilmvirran mukana tai, kuten edellä todettiin, kylmän pisan liikkeessä, jopa satojen kilometrien pituisena solujonona, jonka loppupäässä soluja kuolee samalla kun alkupäähän syntyy uusia.

Elinaika on tietenkin vastaavasti pitempi. Kummassakin tapauksessa voidaan havaita, että ukkosen jälkeinen ilmassa on sama kuin sitä edeltävä, vaikkakin ehkä sateen viilentämä.

Ukkosta muistuttava tilanne voi syntyä myös talvella sakeassa lumi- tai räntäkuurossa, jossa havaitaan jyrinää ja leimahduksia, mutta pyry ehkä häiritsee purkausta niin, että se ei täytä normaalin maasalaman tunnusmerkkejä vaan muistuttanee enemmän pilvisalamaa (ks. kohdat 4.2 ja 4.4).

Salamankaltaisia purkauksia voi esiintyä myös pöly- ja hiekkamyrskyissä sekä tulivuorenpurkausten ja ydinräjähdyspilvien ympärillä (ks. Salanave, 1980).

2.3 Rintamaukkonen

Suuri osa Suomen sään vaihtelevuudesta johtuu siitä, että maamme on kahden ilmassan rajavyöhykkeellä, jossa muodostuu yleensä lännestä itään eteneviä rintamia ja matalapaineita (liite A). Ukkonen syntyy helpoimmin kylmään rintamaan, jossa ero ilmassojen liikkeissä ja ominaisuuksissa on jyrkempi kuin lämpimässä rintamassa. Tiheä kylmä ilma kiilautuu kevyemmän lämpimän ilman alle saaden tämän nousemaan ja laukaisemaan konvektion. Lämmin ilma on tavallisesti myös kosteaa, ja jos lämpötila troposfäärin yläosassa on tarpeeksi alhainen, olosuhteet rintamaukkoselle ovat otolliset. Noin puolet Suomen ukkosista on tätä tyyppiä.

Auringonsäteilyllä ole rintamaukkoseen paljonkaan vaikutusta, vaan tätä ukkoslajia esiintyy yhtä hyvin yöllä kuin päivälläkin. Konvektion laukeamisen aiheuttavat rintamaan liittyvät ilmapirtaukset. Vaikka rintamaukkonen on tunteetomampi maanpinnan ominaisuuksille kuin ilmassaukkonen, sen esiintymistä Suomessa saattaa edistää lämmin meri loppukesällä, jolloin erikoisesti etelästä Suomenlahden yli meille tulevat voimakkaat rintamaukkokset eivät heikkene merkittävästi. Kun rintamaukkonen saapuu elokuisena yönä, pimeys ja hiljainen vuorokaudenaika tekevät ukonilmasta tavallista vaikuttavamman. Sellaisessa tilanteessa nähdään myös äänettä leimahduksia, *elosalamoita* ja *kalevantulia* (kohta 4.6).

Ukonilmoja on pitkin rintamaa, yleensä toisistaan erillään olevina ukkossolualueina. Kun rintama siirtyy, myös solujono etenee, ts. vanhemmat solut kuolevat takareunassa ja uusia syntyy etureunassa. Liike tapahtuu rintaman pituussuunnassa lähinnä silloin, kun rintama pysyy paikallaan tai etenee vain hitaasti. On harvinaista, että ukkosia syntyy koko rintaman pituudelle. Tavallisin kylmien rintamien ja siis rintamaukkosten liikesuunta meillä on lounaasta koilliseen.

Vaikka ilmassojen erot rintaman eri puolilla eivät aina ole kovin suuria, havaitaan tavallisesti rintamaukkosen jälkeen ilman viilenneen ja tulleen kuivem-

maksi (kylmä rintama). Lämmin rintama ei useinkaan tuota ukkosia, vaan ilmassan vaihtuminen tapahtuu vähemmän dramaattisesti.

Monetkaan ukkoset eivät ole puhtaita ilmassa- tai rintamaukkosia tai ainakin niiden luokittelu on vaikeaa. Ilmassoissa saattaa olla esimerkiksi lyhyitä rintamanpätkiä jäänteinä aikaisemmista rintamista.

2.4 Ukkosen ennustaminen

Ukkosen esiintyminen liittyy kiinteästi itse *säätilaan*. Se on laaja-alainen troposfäärin tila, jonka ennustamisessa tuskin lainkaan voidaan ottaa huomioon pienimittakaavaisten paikallisten tekijöiden vaikutusta. Jos esimerkiksi ennustetaan kumpupilvisyyttä, ei voida sanoa mihin ja milloin kukin yksittäinen pilvi syntyy. Samoin voidaan ukkosen osalta ilman kosteuden ja lämpötilajakautuman perusteella laskea esiintymisen todennäköisyys, mutta ei sitä missä kumpupilvet lopulta kasvavat ukkospilven mittoihin.

Kun ennustus ukkosen mahdollisesta esiintymisestä on annettu säätiedotuksessa, voi jokainen itse säätä tarkkailemalla ennakoida ainakin lyhyellä aikavälillä, syntyykö ukkosta lähitöille.

Hiostava ilma on ensimmäisiä merkkejä ukkosen mahdollisuudesta, joskaan viileän vuodenajan (kevään, syksyn) ilmassaukkosissa ilma ei ole yleensä hiostavaa. Kumpupilvien kehityksen seuraaminen niiden kasvaessa kuropilviksi antaa parhaiten käsityksen, voiko ukkosta tulla, varsinkin ilmassaukkosessa. Pilven ukkosaktiivisuus alkaa yleensä pilven sisällä pilvisalamoina (luku 4), joiden epämääräinen jyrinä on "viimeinen varoitus" ennen maasalamoiden esiintymistä.

Säärintaman tulo ja sen ukkosalttius tiedetään yleensä säätiedotuksen perusteella, ja tehtävänä onkin lähinnä tähyillä saapumissuunnan taivaanrantaa. Jos ukkosta on kohdalle tulevassa rintaman osassa, se lähestyy valmiiksi kehittyneenä pilvirykelmänä, jonka jyrinän ja leimahdusten voimistuminen antaa mahdollisuuden arvioida sen saapumista. Arviointia helpottaa kuulo- ja näköhavainnon aikaeroon perustuva etäisyyden laskeminen tai elosalamoiden esiintyminen ennen kuin jyrinää kuullaan lainkaan (kohta 4.6).

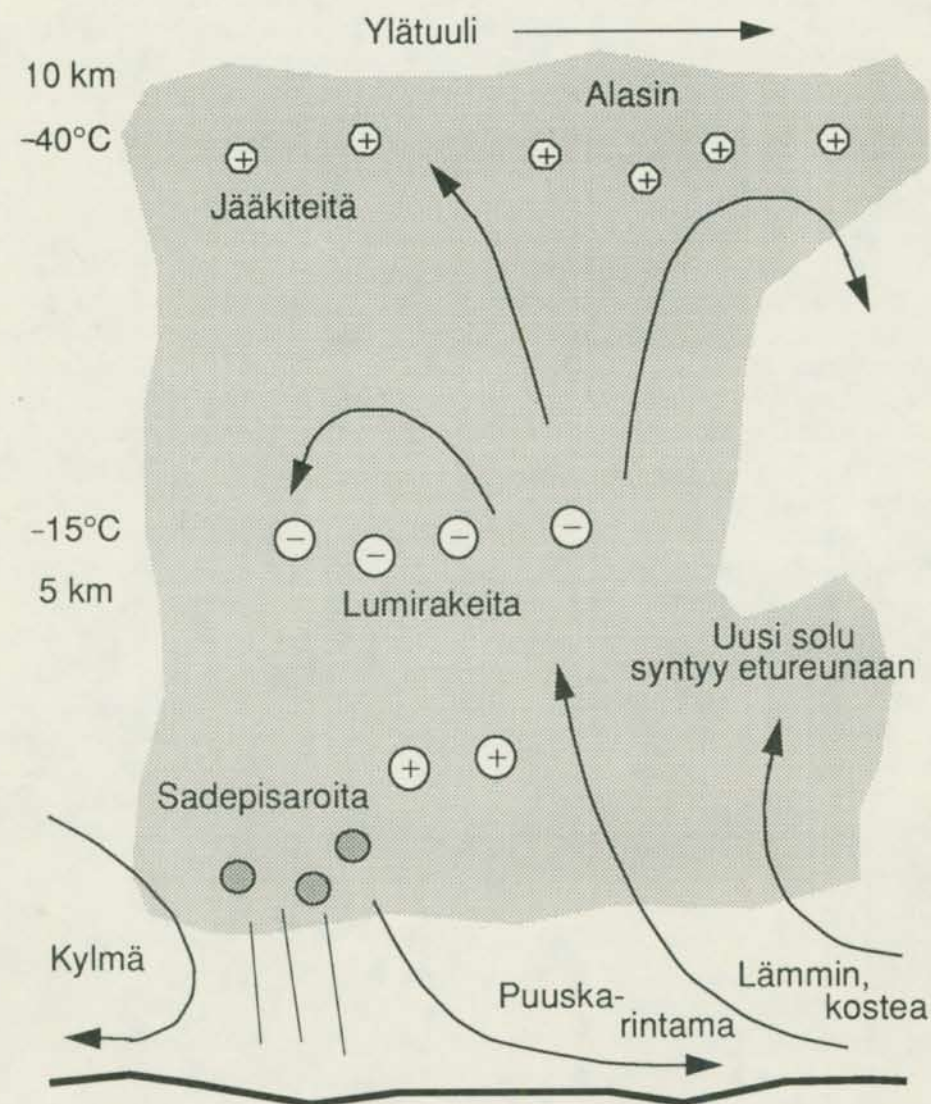
3 Ukkospilvi

Ukkospilven ulkoista olemusta ja synnyn edellytyksiä käsiteltiin jo edellä ja todettiin, että se on kuuropilven kehittyneempi muoto, jonka korkeus Suomessa on kymmenen kilometrin luokkaa (tropiikissa viitisentoista). Pilven ytimenä toimivan konvektiosolun keskellä oleva ylösvirtausalue on halkaisijaltaan kilometrin tai parin luokkaa ja sen virtausnopeus on ehkä 8 m/s (kuva 3.1). Ukkospilven tekee mielenkiintoiseksi ennen kaikkea sen kyky — jos asia ilmaistaan kärjistetysti — tehdä tuulen ja lämpötilaeron avulla vedestä sähköä, vieläpä ilman mekaanisia apuneuvoja! Tarkastelemme ensin tämän "termodynaamisen sähkögeneraattorin" sähköistä rakennetta ja sen jälkeen yritämme etsiä sille selitystä.

3.1 Ukkospilven kehityskaari ja sähköinen rakenne

Kuvassa 3.1 näkyvät kaikki olennaiset ainekset, joista ukkospilvi on koostunut. Pääosa pilven keski- ja alaosaista sisältää pieniä, noin sadasosamillimetrin läpimittaisia vesipisaroita (pilvipisaroita), jotka ovat suoraan tiivistymisen tulosta kostean nousevan ilman ylittäessä tiivistymiskorkeuden. Pilven keskivaiheilla, missä lämpötila on $-10 \dots -20^{\circ}\text{C}$, hiukkaset ovat sakaraisia lumikiteitä ja tiiviimpiä mannarynimäisiä jyvsiä, *lumirakeita*, joiden koko on millimetrien luokkaa. Lumirakeita on myös pilven lämpimämmässä alaosassa. Täysin kehittyneessä ukkospilvessä on yläosa muuttunut kumpupilven kukkakaalimuodosta huntumaiseksi, mikä merkitsee sen koostuvan pienistä jääkiteistä eikä pisaroista. Tropopausin vaiheilla vallitseva voimakas ylätuuli puhalttaa jäähunnun usein pitkälle myötätuuleen ulottuvaksi alasimeksi.

Sähköisessä mielessä ukkospilven rakennetta voidaan kuvata kolminapaiseksi jakautumaksi, *tripoliksi*. Sitä voidaan havainnollistaa myös kaksinapaisena jakautumana, *dipolina*, jonka kahta suunnilleen yhtä suurta varauskeskusta täydentää kolmas pienempi keskus. Dipolin muodostavat negatiivinen varausalue pilven keskiosassa (varaus tyypillisesti -40 C) ja positiivinen (varaus $+40$ C) huipussa. Kol-



Kuva 3.1. Ukkospilvi. Vallitseva ilmvirtaus on vasemmalta oikealle. Lämmin sisäänvirtaus tapahtuu etureunassa ja kylmä ilma painuu takareunassa. Pystyvirtaus eli konvektio on voimakkainta pilven keskellä, n. 8 m/s. Se vie pienet positiivisesti varautuneet jääkiteet (kuusikulmiot) pilven yläosaan, alasimeen. Lämpötilan -15°C vaiheille syntyy suurempia lumirakeita (ympyrät), jotka varautuvat negatiivisiksi ja joita konvektio kannattelee. Sadepisarat muodostuvat sulavista putoavista lumirakeista ja -kiteistä. Ns. puuskarinta syntyy maanpinnan lähellä vastakkaissuuntaisten kylmän ja lämpimän ilman virtausten rajalle.

mas, positiivinen alue (varaus +10 C), on lähellä pilven alareunaa. Käsitukset varauksen suuruuksista vaihtelevat jonkin verran, ja erilaiset pilvimallit antavat erilaisia tuloksia (vrt. lokero 4.4 ja liite B.4). Yläosan positiivinen varaus on alasimen mikrometriluokan jääkiteissä ja negatiivinen keskiosan lumirakeissa; viimeksi mainitut ovat hyvin rajoitetulla korkeusvälillä lämpötilan -15°C paikkeilla. Alaosan positiivinen varaus on niin ikään lumirakeissa, jotka sijaitsevat lähellä lämpötilan nollarajaa.

Kun konvektion mukana nousevat pilvipisarot ylittävät lämpötilan nollarajan (1-2 km:n korkeudessa), ne alijäähtyvät ja lopulta jäätyvät äkillisesti muutamassa pakkasasteessa. Pisarasta sinkoutuu pieniä jääkiteitä, jotka kyllästyneessä vesihöyryssä (liite A.1) kasvavat nopeammin kuin vesipisarot. Niitä voi hämmästyttää myös suoraan tiivistymiskeskusten (pölyhiukkasten) ympärille. Osa jääkiteistä kasvaa sakaraisiksi lumikiteiksi, jotka voivat törmätä alijäähtyneisiin vesipisaroihin ja huurtua tiiviimmiksi lumirakeiksi. (Jääkiteellä tarkoitetaan mikrometrin kokoa olevaa, tavallisesti kuusikulmaisen särmiön tai neulasen muotoista hiukasta. Lumikide on suurempi, millimetrien luokkaa oleva hiukkanen, jossa on erotettavissa sakararakente. Lumihietale on edelleen kasvanut lumikide tai useasta lumikiteestä muodostunut.) Kylmänä vuodenaikana saattaa niin pieni osa vesipisaroista pysyä jäätymättöminä ennen törmäystä, että huurtuminen ei kasvata rakeita vaan lumikiteet takertuvat toisiinsa muodostaen hietaleita. Nämä eivät ilmeisesti kykene enää varautumaan rakeiden tavoin, minkä vuoksi kylmän vuodenajan ukkoset tuottavat yleensä vähän salamoita.

Pystyvirtaus kuljettaa kevyet jääkiteet aina pilven yläosaan asti, jossa ne muodostavat alasimen. Painavammat lumirakeet jäävät ylösvirtauksessa leijumaan pilven keski- ja alaosaan, jossa ne kasvavat kunnes putoavat maahan kuurosaateena. Lumirakeet voivat kulkeutua useaan kertaan ylös- ja alaspäin ja kasvaa huurtumalla. Jos nollalämpötila ylitetään, lumirakeet voivat pinnaltaan välillä sulaa ja taas jäätyä, ja niistä voi kasvaa senttimetrin suuruusluokkaa olevia jäärakeita (eli lyhyesti *rakeita*). Sade on pilven alla olevasta lämpötilasta ja muista olosuhteista riippuen vettä, räntää, lunta tai rakeita. Lumikiteet ja -hietaleet satavat sulaneina maahan vähemmän rankkana sateena kuin rakeet (kuva 3.1).

Pilven kehitys alkaa kumpupilvivaiheella, jossa kumpupilvi kasvaa tai joukko kumpupilviä sulautuu suuremmaksi konvektiosoluksi, jonka leveys lisääntyy sen korkeuskasvun mukana (leveys on 10-20 % korkeudesta). Tätä seuraa kypsä vaihe, jonka merkinä on sateen alkaminen. Riippuu olosuhteista, jääkö pilvi vain kuuropilveksi vai riittääkö sen sähköistyminen myös salamointiin. Solun alapuoliskon pystyvirtaukset käsittävät sekä ylös- että alaspäin virtaavia alueita.

Kun pilvi alkaa sähköistyä, varauskeskusten kasvun alkuvaihe kestää 10-20 minuuttia, kunnes ensimmäinen salama iskee (liite B.6). Kuten edellä todettiin, negatiivisen varauksen alue syntyy melko tarkkaan sellaiselle korkeudelle, jolla ilman lämpötila on -15°C . Siksi pilven sähköistyminen on merkittävää vasta, kun huipun korkeus ylittää tämän tason ja saavuttaa ainakin -20°C kerroksen, ja sala-

moita tuottava aste edellyttää kasvua lähemmäksi lämpötilan -50°C tasoa (tropopausissa). Lämpötila-alueen -15°C korkeus on tropiikissa 8 km vaiheilla ja Suomessa 5-6 km.

Salamointi alkaa tavallisesti pilvisalamoina, koska alussa varauskeskukset ovat lähellä toisiaan. Pilven kehittyessä yläosa loittonee kauemmaksi keskiosasta — sekä pysty- että usein myös vaakasuoraan voimakkaan ylätuulen mukana — ja maasalamoiden osuus kasvaa. Loppuvaiheessa pilven luhistuessa kokoon salamointi on taas pääasiassa pilven sisäistä, samoin voi laskeutuvasta pilven huipusta tulla maasalamoita (positiivisia, ks. kohta 4.3).

Moni on varmaan havainnut, että lähelle osuvaan salamaniskuun liittyy usein voimakas saderyöppy, joka erottuu selvästi vallitsevasta tasaisemmasta kuurosaateesta. Yleisesti hyväksyttyä selitystä sille ei ole vielä löydetty. Yksi mahdollisuus on, että ylösvirtauksen ohella pilven voimakas sähkökenttä kannattelee lumirakeita tai alempana olevia sulaneita (sade)pisaroita, ja salaman purkauksessa kannatusvoima laukeaa äkillisesti päästäen ne putoamaan sateena. Ryöppy saattaa seurata salamaa kuitenkin niin nopeasti, että sade ei ole voinut ehtiä pilvestä asti, eikä tämä selitys sovi ainakaan kaikkiin tapauksiin. Selitys saattaakin olla päinvastainen niin, että sade laukaisee salaman (liite C.1). Erään selityksen mukaan salaman ympärilleen luoma voimakas sähkökenttä saa putoavat sadepisarot takertumaan toisiinsa ja näin suurentuneina putoamaan nopeammin. Myös on mahdollista, että kun lumirakeet pilvessä ylittävät kriittisen koon ja alkavat pudota nopeasti, sähköistyminen ylittää purkauskynnyksen, joka johtaa salamaan samoihin aikoihin kun ensimmäiset suuret (lumi)rakeet tai pisarat saavuttavat maan.

Ukkospilven *laantumisvaihe* saavutetaan, kun virtaukset ylöspäin lakkaavat ja koko pilvi alkaa painua kasaan. Samalla se vaipuu lämpimämpään kerrokseen, jolloin jäähiukkaset alkavat sulaa ja vesipisarot haihtua. Konvektio lakkaa, koska esim. lämpöukkosessa pilvi ja siihen liittyvät sateet varjostavat maanpintaa auriongonvalon lämmitykseltä ja kylmä sade muutenkin jäädyttää maanpintaa ja sen läheistä ilmaa. Rintamaukkosessa kysymys on usein vain siitä, että ukkossolun alle virtaa kylmää ilmaa ja sen viereen rintaman uuteen paikkaan siirtyneelle etureunalle syntyy edullisempi tilanne uuden solun konvektiolle, joka riistää myös äskeisen solun edellytyksiä, ja ukkonen etenee syntyvien ja kuolevien solujen ketjuna rintaman tai vallitsevan ilmavirtauksen mukana. (Vallitseva ilmavirtaus ei ole välttämättä sama kuin maan pinnalla havaittava paikallinen tuuli, ks. kohta 3.2.)

3.2 Ukkospilven ilmapirtaukset

Kuvassa 3.1 näkyvät myös ilmapirtaukset pilvessä ja sen ympärillä. Pilven etureunan alapuolella tapahtuu lämpimän ja kostean ilman sisäänvirtaus, joka on etenemissuunnalle vastakkainen: pilvi etenee "vastatuuleen", kuten monet ovat itse todenneet. Paikallaan olevassa ukkospilvessä voi sisäänvirtausta tapahtua muiltakin reunoilta. Etenevässä solussa voi sen etureunaan kasvaa uuden solun aihe.

Pilvessä ylös nouseva ilma jäähtyy ja kääntyy vaakasuoraksi tropopausin lämpötilainversion (liite A) estäessä kohoamisen ylemmäksi. Osa alaspirtauksesta tapahtuu pilven etupuolella ja osa pilven takaosassa. Jälkimmäistä alaspirtausta voimistaa sade- ja pilvipisaroiden haihtumisen aiheuttama jäähtyminen, samoin takaosan rankkasade "vetää" mukanaan ilmaa alaspäin. Pilven takana mukaan tulee kylmän rintaman tapauksessa siihen liittyvä kylmän ilman vajoaminen ja kääntyminen oikealle rintaman suuntaiseksi.

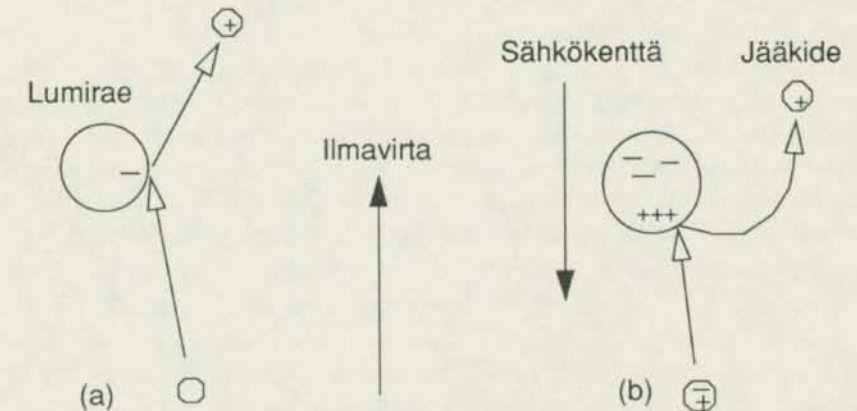
Lämmin sisäänvirtaus ja kylmä ulosvirtaus ovat voimakkaita ja erisuuntaisia, samoin niiden lämpötilat ja kosteudet ovat erilaisia. Niiden rajakohtaan ja edelleen maanpinnalle pilven etupuolelle voi syntyä *puuskarintama*, jossa on voimakkaita pyörteisiä vihureita, *ukkospiuksia*; ne aiheuttavat vahinkoa usein enemmän kuin salamat. Puuskarintama on paikalliseen konvektioon liittyvä ilmiö, eikä sitä pidä sekoittaa suuren mittakaavan säärintamaan.

3.3 Ukkospilven varautuminen

Vesi, tavallisin, arkipäiväisin ja molekyyliarakenteeltaan lähes yksinkertaisin elävän luonnon perusaine, osoittautuu eräissä suhteissa aivan poikkeavaksi muihin yhdisteisiin verrattuna (lokeri 3.1). Sen erikoisominaisuudet varsinkin jääolomuodossa antavat sille keskeisen roolin ukkospilven sähköistymisessä. Sähköistymismekanismista on laadittu lukuisia teorioita, mutta vain yksi teoria, tai oikeastaan kahden teorian yhdistelmä, jota useat tutkijat ovat vuosien varrella kehittäneet, näyttää nykyään saavan selvästi muita laajemman hyväksymisen. Tämä ei merkitse, että teoria olisi jo saatu täysin aukottomaksi.

Teorian perustana on kahta erilaista jääolomuotoa olevien hiukkasten törmäily, jossa tapahtuu sähkövarauksen siirtymistä hiukkasesta toiseen. Lisäpiirteen prosessiin tuo (sähköstaattinen) induktio tai oikeastaan polarisaatio, jossa varautumisen kasvattama sähkökenttä voimistaa varautumista (kyseessä on siis takaisinkytkentä). Seuraavassa kuvataan pääpiirteissään varautumisprosessia, ja siihen perustuva yksinkertainen mutta havainnollinen matemaattinen varautumismalli esitetään liitteessä B.6. Muita varautumisteorioita, joista monet kuvaavat sinänsä

toimivia mutta ukkospilven kannalta tehottomia prosesseja, löytyy useimmista ukkosta käsittelevistä standardikirjoista (ks. kirjallisuusluettelo). Niiden esittely veisi meidät liian kauaksi kiinteäksi ja havainnolliseksi tarkoitettua linjasta. Sähkömääriä ja niihin liittyviä virtoja tarkastellaan toisaalla (lokeri 4.5, liite B.3).



Kuva 3.2. Lumirakeiden varautuminen niiden ja konvektion ylöspäin kuljettamien jääkideiden välisissä törmäyksissä lumirakekerroksen yläosassa. (a) Neutraalitörmäys: varaus siirtyy ehkä lämpötilaeron tai kiderakenteen takia hiukkasesta toiseen. Rakeen pinnassa mahdollisesti oleva vesikerros voi myös vaikuttaa. Jos lämpötila on yli -15°C , varausten merkit vaihtuvat. (b) Induktio-törmäys: voimakas alaspäin suuntautunut sähkökenttä aiheuttaa hiukkasten polarisaatiota (sähköstaattista induktiota). Törmäyskohdan erimerkkiset varaukset neutraloituvat ja hiukkasiin jää nettovaraus, joka on sitä suurempi mitä voimakkaampi sähkökenttä on.

Kuten edellä todettiin, kuuropilvi alkaa sähköistyä, kun sen huippu ylittää korkeuden, jolla ympäröivän ilman lämpötila on suunnilleen -20°C (yli 6 km). Tällöin hieman alempana, lämpötilaa -15°C vastaavalla korkeudella, muodostuu lumirakeita, joista pienimpiä nouseva ilmapirta kannattelee kapealla korkeusalueella ja suurimmat putoavat lämpimämpään alueeseen. Nousevan ilman mukana kulkee sekä alijäähtyneitä vesipisaroita että jääkiteitä, joista edelliset törmäilevät lumirakeisiin ja kasvattavat niitä huurruttamalla; jääkiteiden törmäessä nämä vain kimmahtavat pois lumirakeesta.

Sähkön erottuminen tapahtuu jääkiteiden törmäessä lumirakeisiin. Alussa, kun pilven varautuminen on vielä vähäistä ja varausten sähkökenttä on heikko, kyseessä ovat *neutraalitörmäykset*, joissa ei kosketuskohdassa ole alun perin varauksia, vaan varausepätasapaino syntyy itse törmäyksessä. Epätasapaino aiheuttaa erimerkkisten varausten siirtymistä törmääviin osapuoliin. Varautumisen merkki

riippuu voimakkaasti lämpötilasta: jos se on alle -15°C , lumirae varautuu negatiiviseksi ja jääkide positiiviseksi, ja korkeammassa lämpötilassa merkit vaihtuvat. Tähän johtopäätökseen on tultu laboratoriosimuloinneissa, ja se on myös yhtäpitävä mittauksilla havaitun pilven varausjakautuman kanssa (ks. esim. Williams, 1988). Erikoisen merkittävää on, että negatiivisen varauksen alue syntyy korkeussuunnassa erittäin kapeana kerroksena -15°C lämpötilan tuntumaan. Kuva 3.2a havainnollistaa tätä varautumistapahtumaa. Laboratoriokokeiden perusteella varautuminen on myös riittävän voimakasta ja nopeaa selittämään pilvissä havaitun varauksen kasvun ainakin alkuvaiheessa. Kun varautuminen on saavuttanut tietyn pisteen, sen kasvattama sähkökenttä tuo mukaan induktion, joka tehostaa varauksen siirtymistä törmäyksissä (kuva 3.2b). Matemaattisen mallin (liite B.6) mukaan neutraalitörmäykset tai induktiotörmäykset eivät kummatkaan riitä yksin kehittämään havaittua varausmäärää, mutta yhdessä ne pystyvät siihen.

Alaspäin suuntautuva sähkökenttä vaikuttaa varautumiseen eniten lumirae-kerroksen yläosassa. Kasvaneet ja varautuneet lumirakeet putoavat hitaasti ja niiden yläpuolelle voimakkaan kentän alueeseen kasvaa uusia lumirakeita. Negatiivisen varausalueen keskellä kenttä on heikko ja sen alapuolella ylöspäin suuntautunut. Pilven alaosassa olevien lumirakeiden varautuminen positiiviseksi saattaa johtua viimeksi mainitusta kentästä eikä niinkään korkeammasta lämpötilasta, jolloin tämä prosessi olisi vielä selvemmin induktiivinen.

Ongelmaksi jää vielä, mitä neutraalitörmäyksessä jääkiteen ja lumirakeen kosketuskohdassa tapahtuu mikroskooppisesti. Tässä kysymyksessä joudutaan meteorologiasta fysikaaliseen kemiaan, ja ainakaan toistaiseksi ei varauksen siirtymistä ole pystytty tyhjentävästi selittämään. Lokerossa 3.1 esitetään hieman taustaa prosessin luonteesta, mutta varsinaista selitystä ei kyetä antamaan.

Lokero 3.1. Jään rakenteesta

Vesimolekyyli H_2O koostuu happiatomista (O), johon on sitoutunut kaksi vetyatomia (H). Sen avaruusrakenne $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ muodostaa O -kärkisen kulman, jonka suuruus on $104,5^{\circ}$. Tämä bumerangimuoto tarkoittaa itse asiassa atomiydinten muodostamaa kuviota; keskellä on hapen ydin (8 protonia ja 8 neutronia) ja kummassakin päässä vety-ytimen ainoa protoni. Molekyylin 18 elektronia ympäröivät koko kuviota, mutta ne ovat tiheämmässä happiytimen lähellä. Vetyatomien elektronien siirtyminen lähemmäksi happea merkitsee, että kulman keskivaiheilla on ylimääräistä elektronien negatiivista varausta ja päissä vetyjen protonien positiivista, joten vesimolekyyli on polaarinen: sitä voidaan pitää sähköisenä dipolina.

Kun vesi on nesteinä, molekyylien välimatkat ovat pieniä ja hapen lähellä olevat elektronit vetävät puoleensa toisen molekyylin vetyjen protoneja. Tätä melko heikkoa mutta merkittävää voimaa sanotaan *vetysidokseksi*, ja sen ansiosta vedellä on taipumus nesteinäkin muodostaa molekyyliketjuja, joiden kokoa rajoittaa lämpöliikkeen irrottava vaikutus. Vetysidos pitää vettä koossa niin hyvin, että pienimolekyylliseksi nesteeksi sen kiehumispiste on harvinaisen korkea.

Kun lämpötila laskee, lämpöliike heikkenee ja molekyylit sitoutuvat toisiinsa tiukemmin. Veden tiheys pienenee, mutta vain $+4^{\circ}\text{C}$:n lämpötilaan asti eikä sulamispisteeseen kuten yleensä muilla aineilla. Tämän lämpötilan alapuolella molekyyliketjut alkavat muodostaa säännöllisempiä rakenteita, vaikka täydellinen jään kiderakenne voidaan saavuttaa vasta 0°C :ssa. Jäätyminen ei tosin aina tapahdu tässä lämpötilassa, vaan puhdas vesi varsinkin leijuvina pisaroina saattaa alijäähtyä useaan pakkasasteeseen ennen kuin se jäätyy äkillisesti.

Jäällä on paineesta ja lämpötilasta riippuen monenlaisia rakenteita, mutta normaalioloissa vain yksi. Vesimolekyylin kulma on sen verran lähellä 120° :ta, että jää muodostaa kuusikulmaisen kidehilan, kuin mehiläiskennon, jonka kulmissa happiytimet ovat (ks. esim. Runnels, 1966). Kennojen sisään jää suhteellisen paljon tyhjää tilaa, minkä vuoksi veden tiheys kiinteänä (jäinä) on pienempi kuin nesteinä, päinvastoin kuin useimmilla muilla aineilla.

Metalleissa atomien ytimet muodostavat kidehilan, jossa osa elektroneista voi liikkua hyvin vapaasti. Siksi metallit johtavat hyvin sähköä, joka kulkee elektronien liikkeen välityksellä. Myös hankaussähkössä on tavallisesti kysymys elektronien siirtymisestä materiaalista toiseen. Sähköä johtavissa nesteissä (elektrolyyteissä) varauksen kantajina toimivat ionit, molekyylin osat, joissa on ylimääräistä varausta. Nestemäisessä vedessä osa molekyyleistä *dissosioituu* elektrolyytiksi siten, että toisen vedyn ydin (protoni) irtoaa ja muodostaa vesimolekyylin kanssa positiivisen oksonium-ionin H_3O^+ . Toinen puoli dissosioituneesta molekyylistä jää negatiiviseksi OH^- -ioniksi eli hydroksyyliksi. Jos elektrolyytti kiteytyy, ionit yhtyvät taas molekyyleiksi eikä (puhdas) kide johda sähköä. Jää tekee tässä suhteessa poikkeuksen. Kidehilan kuusikulmaisissa onkaloissa on niin paljon tyhjää tilaa, että vedyn protoni voi siirtyä niihin ja liikkua tarpeeksi vapaasti välittämään sähkövirtaa. (Sähkövirta kulkee yleensä varausten peräkkäisinä törmäyksinä, joissa yksittäisen varauksen matka on pieni.)

Jos kaksi lämpötilaltaan erilaista jäähiukkasta törmää toisiinsa, voi hiukasten välillä tapahtua protonien siirtymistä (termosähköinen ilmiö). Toisaalta myös alijäähtyneiden pilvipisaroiden määrä ympäröivässä ilmassa näyttää vaikuttavan varautumiseen ja -15°C :n kriittisen lämpötilan olemassaoloon. Selitystä tälle joudutaan vielä odottamaan.

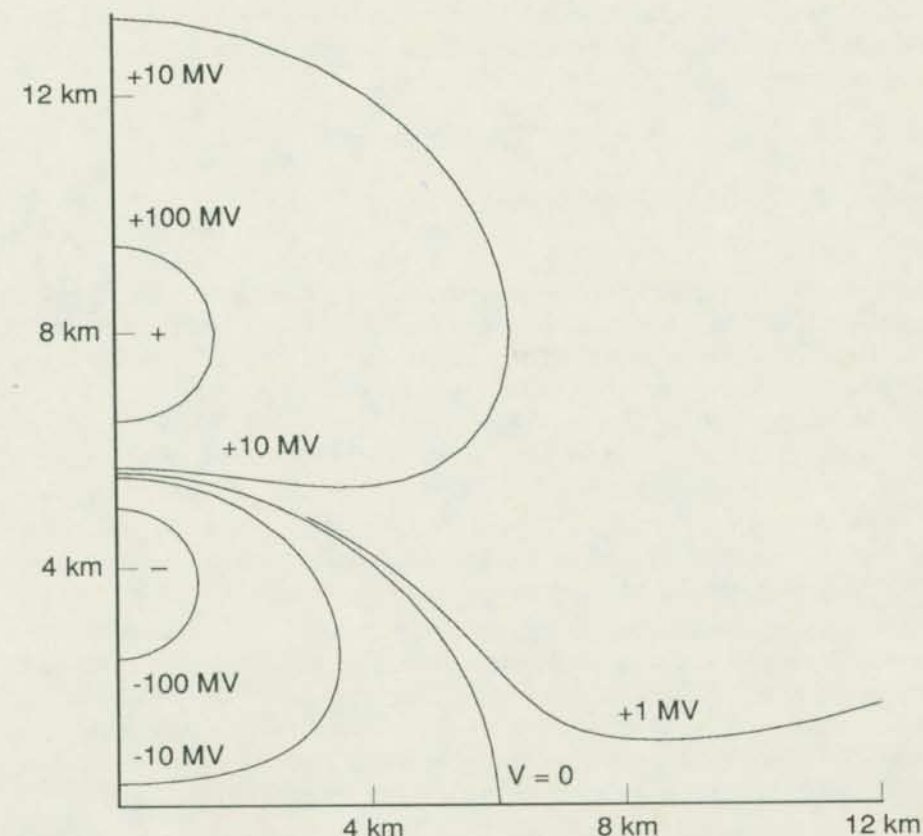
4 Salama

4.1 Ukkospilven sähköpotentiaali

Kun ukkospilvi on — tavalla, jonka kaikkia yksityiskohtia ei siis vielä täysin tunneta — varautunut tiettyyn pisteeseen, varauskeskusten jännite purkautuu salamoina. Sähköpurkaus ilmassa on monimutkainen ja vaikeasti kuvattava tapahtuma, jota selvitetään lähemmin liitteessä C; tässä tyydytään vain ylimalkaiseen kuvailuun. Pilven varauksista jätetään nyt huomiotta alaosan pieni positiivinen alue ja pilveä pidetään kaksinapaisena dipolina, jonka muodostavat keskiosan negatiivinen ja yläosan positiivinen varauskeskus. Pilven sähköistä luonnetta ja erikoisesti sen roolia ilmasähkövirtapiirin generaattorina voidaan silloin helposti havainnollistaa matemaattisella dipolimallilla (liite B.4).

Ukkospilven varauskeskukset synnyttävät ympärilleen sähkökentän, joka aiheuttaa sähköisiä veto- ja poistovoimia varauksissa, kuten ilmassa olevissa ioneissa, sekä johteissa, kuten maassa. Pilven alapuolella oleva maanpinta on lähempänä negatiivista varauskeskusta, joten siihen kertyy ympäröivästä maasta positiivista varausta. Kertyminen on voimakkainta korkeissa ja terävissä maastonkohdissa ja rakenteissa. Pilven yläosan positiivisen varauksen vaikutus tuntuu selvimmin pilveä reunustavassa maassa, johon indusoituu negatiivista varausta. Liitteessä B.4 esitetty malli pilven varauksista ja niiden aiheuttamista jännitteistä on kuvassa 4.1. Sähkökenttä jossakin kohdassa voidaan laskea jakamalla kahden tasapotentialipinnan potentiaaliero (= jännite) pintojen välisellä etäisyydellä. Esimerkiksi lähinnä maanpintaa (missä potentiaali on nolla) oleva tasapotentialipinta pilven alapuolella edustaa -10 MV:n potentiaalia n. 400 m:n korkeudessa, joten näiden osamäärästä saadaan (ylöspäin suuntautuvan) sähkökentän suuruusluokaksi maanpinnalla aivan pilven alapuolella 25 kV/m. Tätä voi tosin pilven alaosaan olevan positiivisen varauksen kenttä heikentää. Kun jännite eri varausalueiden välillä kasvaa tarpeeksi suureksi, sähkökenttä saavuttaa joissakin kohdin ns. läpilyöntiarvon (-kynnyksen) (liite C.1) laukaisten salamapurkauksen.

Jos purkautuvat kohtiot ovat yhdensuuntaisia levyjä, niiden välinen sähkökenttä on yksinkertaisesti jännitteen ja etäisyyden suhde. Toinen tai molemmat kohtiot



Kuva 4.1. Ukkospilven dipolimalli. Kaksi pistevarausta on ilmassa, jonka sähköjohtavuus kasvaa eksponentiaalisesti korkeuden mukana (liite B.4). Kasvunopeutta kuvaava suure s on $4,5$ km. Varaukset ovat pystyakselilla $-$ ja $+$ merkkien kohdalla (4 km ja 8 km korkeuksilla) ja niiden suuruudet ovat $q_1 = -25$ C ja $q_2 = +25$ C. Käyrät kuvaavat potentiaalin tasavertopintoja, jotka ovat symmetrisiä pystyakselin suhteen. Potentiaali on liian suuri $1-2$ km suuruisilla alueilla varausten ympärillä, sillä todellisuudessa varaukset eivät ole piste-mäisiä, vaan ovat jakautuneet halkaisijaltaan kilometrien luokkaa oleviin tilavuuksiin. Maan pinnalla potentiaali vaihtaa merkinsä ja sähkökenttä muuttuu ylöspäin suuntautuvasta alaspäin suuntautuvaksi, kun pilven alapuolelta siirrytään yli $5-6$ km etäisyydelle.

ovat laboratoriokokeissa usein myös palloja, jolloin läpilyöntikenttä saavutetaan pienemmällä jännitteellä etäisyyden ollessa sama. Jos kohtiona on terävä kärki, siinä sähkökenttä voi tulla paikallisesti niin suureksi, että ilman molekyylit ionisoituvat (niistä irtaava elektroneja) ja syntyy kärkipurkaus, joka alentaa läpilyöntikynnystä

(liite B.3). Ukkospilvessä todennäköisesti voimakas sähkökenttä aiheuttaa kärkipurkauksia jää- ja lumikiteiden kulmissa ja sakaroissa edesauttaen salamapurkauksen syntymistä. Seuraavassa esitettäviä eri purkauslajeja ja -vaiheita kuvataan yksityiskohtaisemmin liitteessä C.1.

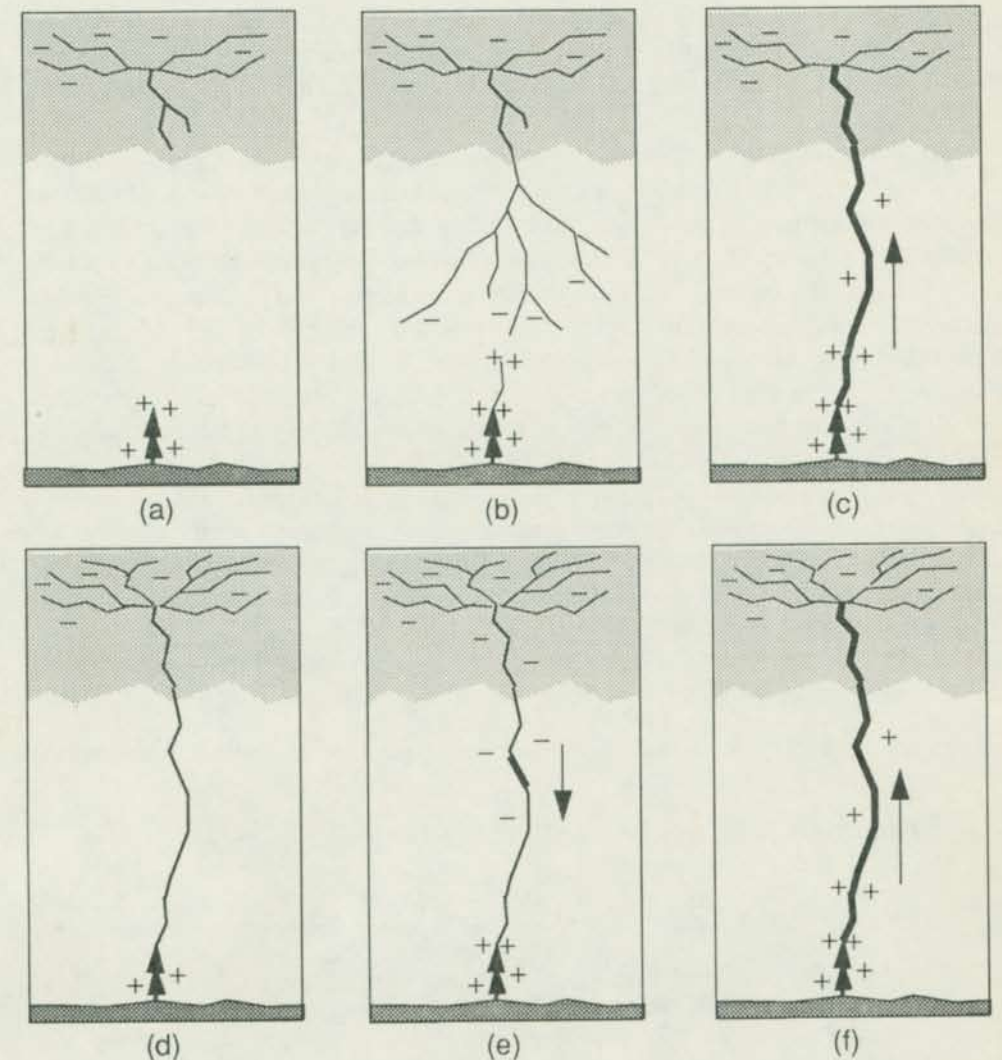
4.2 Negatiivinen maasalama

Jos pilven lähellä maassa ei ole korkeita mastoja tai muita vastaavia rakenteita, purkaus alkaa pilven jommastakummasta varauskeskuksesta tai niiden lähistöltä, maasalaman tapauksessa tavallisesti negatiivisen alapuolelta (ehkä pilven alaosan positiivisesta varauksesta tai sen lähellä olevasta sateesta; ks. liite C.1). Varautuneiden hiukkasten keskuudessa tapahtuu paikallisia *valmistelevia* (preliminäärisiä) *purkauksia*, joissa ilmeisesti muodostuu voimakkaasti haaroittuneita ionisoituneita purkaussäikeitä (*soihdumpurkauksia*) sähköä johtaviksi kanaviksi varausten välille. Kanavien ansiosta voi johonkin kohtaan kertyä niin paljon varausta, että se lähtee purkautumaan yhtenäisenä kanavana kohti toista varauskeskusta tai maata. Negatiivisen maasalaman tärkeimpiä vaiheita havainnollistaa kuva 4.2.

Valmistelevan purkauksen seurauksena jokin ympäristöään voimakkaammaksi kasvanut varauskeskittymä sylkäisee ionivyöryn, joka jaksaa edetä suunnilleen 25 metrin matkan. Tähän sähköä hyvin johtavaan kanavaan syöksyy valmistelevan purkauksen luomasta verkosta uutta varausta ja purkaus pystyy etenemään toiset 25 metriä, mahdollisesti myös haaroittuen. Polveileva ja haaroittuva purkaus etenee nykäyksittäin kohti maassa olevaa vastakkaisen varauksen aluetta. Tätä suhteellisen hidasta ja heikkoa vaihetta sanotaan *esisalamaksi*.

Kun esisalama on edennyt noin sadan metrin päähän maasta, sen kärjen suuri jännite indusoi maahan, mieluiten johonkin korkeaan kohtaan, niin voimakkaan sähkökentän, että tästä lähtee ylöspäin ns. *vastasalama*. Se tavoittaa esisalaman kärjen n. 50 metrin korkeudella, ja ionisoitunut, sähköä johtava *salamakanava* on auki varauskeskuksen ja maan välillä. Heti tämän jälkeen kohoaa maasta tai tarkemmin sanoen esisalaman ja vastasalaman kosketuskohdasta ylöspäin kirkas, voimakas virtapulssi, *pääsalama*, jonka myötä salamakanavan ja sen lähdealueen negatiivinen varaus neutraloituu maassa olleella positiivisella varauksella. Salama voi päättyä tähän, mutta usein pilvestä syöksyy alas kirkas ja nopea 50 m pituinen *nuolisalama*, eräänlainen esisalama, joka virkistää kanavan uudelleen, ja seuraa uusi pääsalama.

Nuolisalama syntyy, kun pääsalama saavuttaessaan pilven varauskeskuksen vahvistaa ja laajentaa siellä olevia valmistelevan purkauksen kanavia. Näistä nuolisalamaa valmistelevista heikoista purkauksista käytetään nimitystä *J-purkaus*. Sen voimakkaasti haaroittunut kasvu kohti varauskeskuksen käyttämät-



Kuva 4.2. Negatiivisen maasalaman vaiheet. (a) Valmisteleva purkaus ja esisalaman alkua. (b) Esisalama haaroineen ja sen indusoima vastasalama. (c) Kirkas pääsalama etenee maasta pilveen. (d) Latvapurkaus etsii uutta varausta. (e) Nuolisalama aktivoi kanavan uudelleen. (f) Uusi pääsalama nousee maasta pilveen.

tömiä varauksia antaisi aiheen esimerkiksi kuvaavampaan nimitykseen *latvapurkaus*. Nuolisalama-pääsalamapareja voi joskus olla jopa toistakymmentä, jolloin salaman nähdään selvästi välkkyvän. Enemmän kuin yhden pääsalaman sisältävää salamaa sanotaan moninkertaiseksi (salaman *kerrannaisuus* on silloin suu-

rempi kuin 1). Noin puolet moninkertaisista salamoista on sellaisia, että kahden pääsalaman välissä kanavaa pitkin kulkee nuolisalaman sijasta jatkuva vaikkakin heikohko sähkövirta; tässä tapauksessa voidaan käyttää nimitystä *hybridisalama* (*sekasalama*).

Peräkkäiset pääsalamat iskevät yleensä samaan kohtaan, pitkin samaa kanavaa. Toisinaan voi nuolisalama aktivoida kanavan alaosaan toisen haaran, ja salaman nähdään iskevän kahteen tai useampaan paikkaan. Kyse on siis saman iskun eri pääsalamoista. Tarkka havaitsija saattaakin todeta silmin pääsalamoiden aikaeron.

Normaalisti monenkin pääsalaman yhteinen kanava näkyy kapeana juovana, *viivasalamana*. *Nauhasalama* syntyy, jos voimakas tuuli ehtii siirtää kanavaa sivusuunnassa niin paljon, että pääsalamat kulkevat hieman eri paikoissa. Joskus voi salamakanava sammua pääsalaman jälkeen tavallista hitaammin ja jakautua valaisevien kanavanosien ketjuksi ennen häviämistään. Tällaista salamaa sanotaan *helminauhasalamaksi*, vaikka joskus sen ulkonäkö muistuttaa enemmän nakkimakkaraketjua. Sen on myös arveltu olevan yhteydessä pallosalaman syntyyn (Singer, ks. Golde, 1977). Helminauhasalamaa ei ole pystytty selittämään tyydyttävästi, mutta yksi siihen vaikuttava tekijä voi olla kanavan mutkittelu. Esisalaman askelten suunnanmuutokset noudattavat ns. normaalijakautumaa ja keskimääräinen kääntymiskulma on 16° (ks. Uman, 1984).

Lokero 4.1. Iskeekö salama alas vai ylös?

Toisinaan esitetään kysymys ja jopa lyödään vetoa siitä, iskeekö salama alas vai ylös. Tarkastelu voitaneen rajoittaa edellisessä kappaleessa ja kuvassa 4.2 esitettyyn tavallimpaan tapaukseen. Esisalama alkaa pilvestä, etenee kohti maata ja iskukohdan valinta tapahtuu vasta viimeisen sadan metrin aikana. Esisalama on myös niin hidas, että silmä ehtii tajuta sen liikesuunnan alaspäin. Tässä mielessä voidaan sanoa, että salama iskee ylhäältä alas (poikkeus on korkeasta mastosta ylöspäin lähtevä esisalama).

Toisaalta pääsalama, tai joukko pääsalamoita, nousee maasta ylös. Se on niin kirkas, että sen ansiota on salaman valoisuus ja moninkertaisen salaman välkkyminen, mutta se on myös niin nopea, että silmä ei kykene havaitsemaan sen etenemissuuntaa.

Voidaan siis sanoa, että salama iskee alas tai ylös riippuen siitä, mitä piirrettä halutaan korostaa. Riskin kannalta on ehkä oikeampaa ajatella suuntaa ylhäältä alas, koska se määrää iskupaikan.

Negatiivisia maasalamoita on Suomessa ehkä kolmasosa kaikista (suurin osa on pilvisalamoita), ja yleensä juuri niitä tarkoitetaan puhuttaessa salamoista.

Esisalaman hakeutumiseen tiettyyn kohteeseen maassa vaikuttaa kuvan 4.1 yhteydessä mainittu sähkökenttä, joka maan pinnalla pilven alla jo ennen esisalaman syntymistä voi olla 25 kV/m luokkaa. Jos maastossa on korkea terävä kärki, kenttä voimistuu siinä vastaavasti ja voi aiheuttaa kärkipurkauksen (liite C.1). Näin syntyvien positiivisten ionien synnyttämä varauspilvi voi korkealle ulottuessaan ohjata esisalaman kohti kärkeä.

4.3 Positiivinen maasalama

Ukkospilven positiivisen varauksen alue sen alasinossassa on paljon kauempana maasta kuin negatiivinen varaus, joten sen on helpompi purkautua negatiiviseen alueeseen kuin maahan. Negatiivinen varauskeskus myös tavallisesti varjostaa pilven huippua "näkemästä" maata. Eräissä tapauksissa kuitenkin voi positiivinen alue purkautua maahan, jolloin puhutaan positiivisista salamoista.

Keväisissä ja syksyisissä viileissä olosuhteissa pilvi ei jaksa kasvaa kovin korkeaksi, ja samoissa oloissa voimakkaat ylätuulet siirtävät huippua vaakasuunnassa sivuun negatiivisen varauksen yläpuolelta. Kun negatiivinen varaus syntyy aina tiettyyn pilven osaan, voivat yläosan jääkiteet puolestaan siirtyä ilmavirtojen mukana huomattavankin kauas negatiivisesta keskuksesta. On myös mahdollista, että sopivissa olosuhteissa negatiiviset lumirakeet ehtivät suureksi osaksi sataa maahan ennen kuin niiden varaus on purkautunut salamoina; yläosan jääkiteiden poistuminen ilmasta (lähinnä sulaminen ja haihtuminen) on paljon hitaampaa.

Vastaavanlainen tilanne tulee eteen keskikesän korkeissa ukkospilvissä, kun negatiivinen varaus on pääosin purkautunut salamoina ja osa positiivisesta varauksesta on jäljellä. Positiivinen salamointi onkin tunnusomaista aivan kesäukkosien loppuvaiheelle. Suomessa positiivisia salamoita on 10-15 % maasalamoista.

Positiivinen salama alkaa positiivisina soihdipurkauksina pilven yläosan jääkiteistä ja jatkuu positiivisena esisalamana. Valmisteleval purkauksen ja esisalaman välinen ero on siksi pienempi kuin negatiivisella salamalla. Kuten liitteessä C.1 todetaan, positiivinen esisalama on tasaisesti etenevä ja vähemmän haaroittuva kuin negatiivinen ja avaa kanavan tehokkaammin. Sen seurauksena positiivinen salama on lähes aina yksinkertainen ja sen pääsalaman voimakkuus on keskimäärin kaksinkertainen verrattuna negatiiviseen pääsalamaan. Negatiivisen salaman energia on silti samaa luokkaa, koska sen kerrannaisuus on keskimäärin kaksi. Positiivisen pääsalaman kesto on hieman pitempi kuin negatiivisen, joten se ehtii kuumentaa iskukohteensa helpommin ja sytyttää paloja.

4.4 Pilvisalama ja ilmasalama

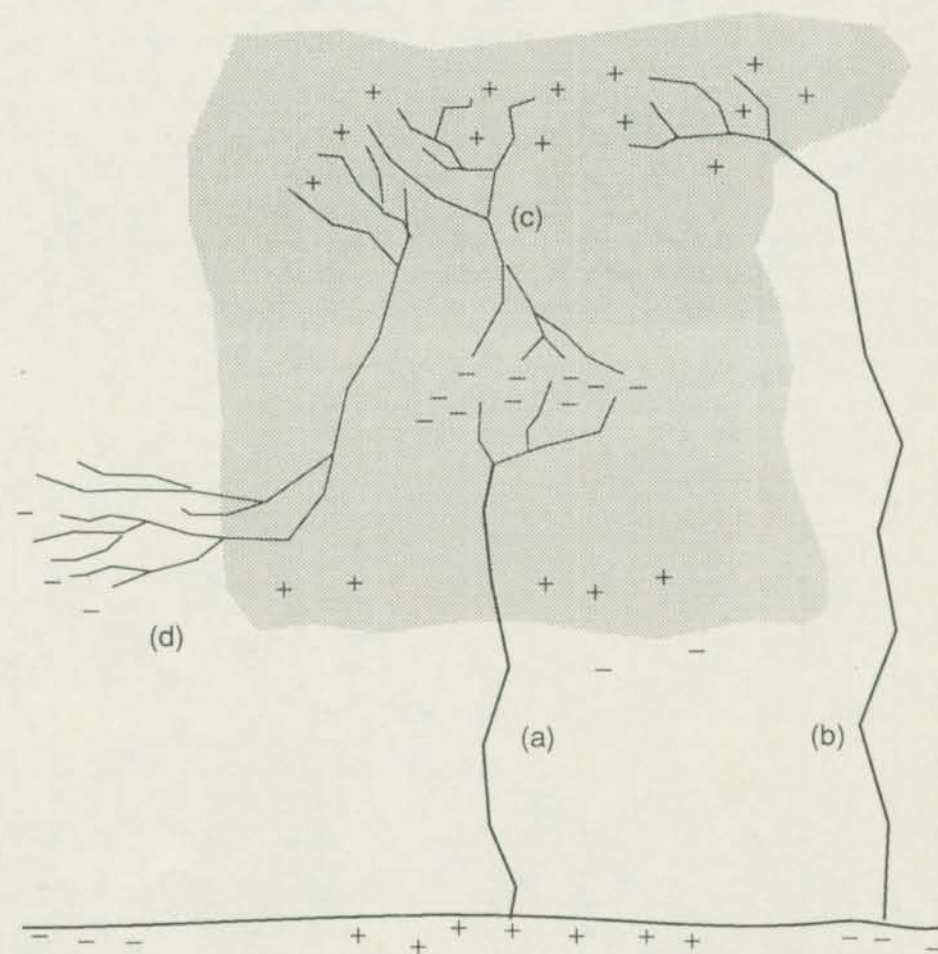
Pilvisalama on salamapurkauksista yleisin; yleisyys riippuu pilven korkeudesta ja sitä kautta leveysasteesta: tropiikissa pilvisalamoita on kuusinkertaisesti maasalamiin verrattuna, Suomessa kaksinkertaisesti. Pilvisalaman leimahdus näkyy vain välillisesti heijastuksina pilvestä, kesäpäivänä tuskin lainkaan, ja jyrinä on vähemmän terävää kuin maasalamalla. Pilvisalama on maan pinnalla salamariskin kannalta harmiton. Sen purkaustapaa voisi luonnehtia voimakkaaksi esisalamaksi; siinä ei ole voimakasta pääsalamapulssia kuten maasalamoilla. Pilvisalaman neutraloima sähkömäärä on kuitenkin samaa luokkaa kuin maasalamoiden.

Pilvisalama alkaa useimmiten varauskeskusten välisen alueen yläpuolelta positiivisen varauksen alueesta positiivisena alaspäin ja osittain sivulle etenevänä soihdumpurkauksena, samantapaisena kuin positiivisen maasalaman esisalama. Saapuessaan negatiiviseen alueeseen se haarautuu voimakkaasti; sille sopisi nimitys *huiskupurkaus*. Se on hidas ja kestää peräti 0,25 s. Tämän jälkeen kanavassa kulkee negatiivisesta takaisin positiiviseen keskukseen eteneviä nopeita *rekyyli-purkauksia*, edellä mainitun latvapurkauksen kaltaisia, joiden lukumäärä on kymmenkunta ja aikaväli niin pitkä, että tämä osa pilvisalamasta kestää toiset 0,25 s. Koko pilvisalama kestää siis puolisen sekuntia (Ogawa, ks. Volland, 1982).

Lokero 4.2. Salaman värit

Salamakanavan voimakas kuumeneminen pääsalaman aikana saa siinä olevat atomit ja ionit virittymään ja lähettämään valoa niille ominaisilla aallonpituuksilla. Tärkeimmät säteilijät ovat neutraali happi ja typpi sekä kertaalleen ionisoitunut (yhden elektronin menettänyt) typpi. Voimakkain säteily esiintyy hapen aallonpituudella 777,4 nm ja typen aallonpituudella 868,3 nm, jotka ovat lähi-infrapunassa eivätkä siis näy silmin. Muita lähi-infrapun spektriviivoja ovat 744,2 nm, 822,3 nm ja 862,9 nm (typpi) sekä 794,7 nm ja 844,7 nm (happi). Näkyvällä valolla tärkeimmät viivat ovat kertaalleen ionisoituneen typen sininen 463,0 nm, sinivihreä 500,5 nm, vihreä 568,0 nm (kirkkain) ja oranssi 594,2 nm. Ultraviolettialueella tärkein on ionisoituneen typen 333,0 nm. Silmä näkee salaman sinertävänä. Selkeä esitys väreistä on Salanaven (1980) valokuvateoksessa. Katso myös Uman (1984) ja Orville (1980).

Pääsalaman hetkellinen valoteho on suurimmillaan megawatteja metrillä, eli 1 km:n näkyvällä kanavan osalla useita gigawatteja (Uman, 1984).



Kuva 4.3. Salaman lajit. (a) Negatiivinen maasalama. (b) Positiivinen maasalama. (c) Pilvisalama. (d) Ilmasalama. Pilvisalama voi iskeä myös eri soluihin liittyvien varauskeskusten välillä. Ilmasalama voi alkaa myös negatiivisesta keskuksesta ja purkautua pilven alapuolella olevassa ilmassa.

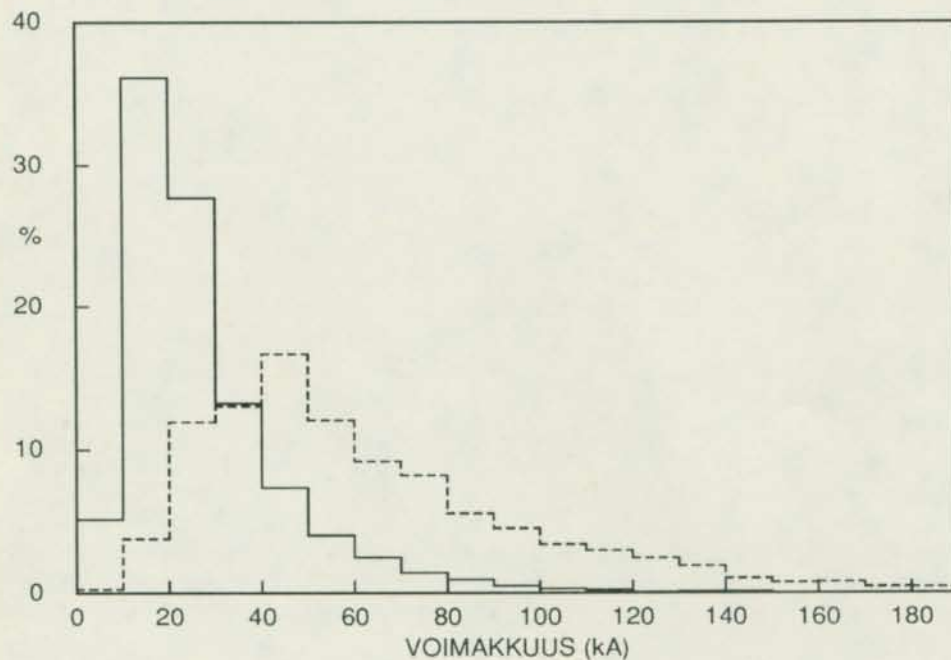
Ukkospilven salama-aktiivisuus alkaa yleensä pilvisalamoina, kun pilven korkeus ei ole vielä kovin suuri ja varauskeskukset ovat lähellä toisiaan.

Pilvisalamointi ei rajoitu välttämättä yhteen pilveen, vaan kovissa ukon-ilmoissa, joissa on samanaikaisesti useita vierekkäisiä pilviä (soluja), pilvisalamat voivat edetä pitkällekin pilvestä toiseen, mikä on havaittu mm. satelliiteista.

Kun esisalama lähtee liikkeelle pilvestä, sillä ei ole "tietoa" tulevasta iskukoh-

dasta, koska purkaus alkaa paikallisesti eikä kahden tietyn kohtion välillä kuten yksinkertainen kipinä. Näin on laita erikoisesti pilvisalamalla, jolle negatiivisen keskuksen hajallaan leijuvat varaukset eivät edes muodosta yhtenäistä iskukohtaa. Ilmassa pilven ulkopuolella leijuvat aerosoli- ja ionivaraukset, joita ukkospilven aiheuttamat kärkipurkaukset maassa ovat voineet lisätä (liite C.1), saattavat ohjata pilvisalamien purkausreittiä niin paljon, että se eksyy ulos pilvestä. Jos purkaus päättyy pilven ulkopuolella leijuviin varauksiin, se muodostaa heikohkon mutta runsaasti haaroittuvan *ilmasalaman*. Pilvisalamien haaroittuminen negatiivisessa varauskeskuksessa on luultavasti samankaltaista. Negatiivisesta keskuksista lähtevä maasalama voi myös tyrehtyä ilmasalamaksi pilven alapuolelle. Pilven ulkopuolelle tuleva pilvisalama voi myös löytää tiensä takaisin pilveen, joko samaan tai vieressä olevaan.

Eri salamalajeja havainnollistaa kuva 4.3. Sivulla 33-40 on salamoista otettuja valokuvia selityksineen. Tällä sivulla oleva kuva liittyy tekstiin sivulla 41.



Kuva 4.4. Suomessa paikannettujen negatiivisten (ehyt viiva) ja positiivisten (katkoviiva) maasalamioiden voimakkuusjakautumat. Voimakkuus on paikantimen mittaama ja perustuu pääsalaman sähkömagneettisen pulssin huippuarvoon. Etäisyyden ja valmistajan ilmoittaman kertoimen avulla voimakkuus on muutettu pääsalaman huippuvirraksi (kiloampeereissa).

4.5 Salaman voimakkuus ja kerrannaisuus

Salamanpaikannin (kohta 5.1) pystyy maasalaman paikan lisäksi ilmoittamaan sen voimakkuuden ja kerrannaisuuden. Mitattava "voimakkuus" on itse asiassa sähkö- tai magneettikentän voimakkuus havaintopaikalla, mutta tietyin oletuksin se voidaan muuntaa pääsalaman virranvoimakkuuden huippuarvoksi (huippuvirraksi), kun etäisyys tiedetään paikannuksen perusteella. Muunnoskerroin on valmistajan ilmoittama ja sisältää epävarmuutta. Nykyisin käytössä oleva kerroin antaa negatiivisille salamoille keskimääräisen huippuvirran arvoksi n. 30 kiloampeeria; se on lähellä muualla maailmassa aikaisemmin omaksuttua keskiarvoa, joka on määritetty muilla menetelmillä. Salamoiden voimakkuudet vaihtelevat suuresti, mutta niiden jakautuma pysyy jokseenkin samanlaisena. Kuvassa 4.4 (s. 32) on Suomessa havaittujen maasalamioiden voimakkuuksien jakautumat erikseen negatiivisille ja positiivisille. Jakautumat ovat vinoja, ja aritmeettiset keskiarvot (30 kA ja 61 kA) sijoittuvat huippujen oikealle puolelle.

Huomataan, että negatiivisten salamoiden jakautuma on kapea, se ylittää tuskin 100 kA, kun taas positiivisten jakautuma on leveämpi ja ulottuu 200 kiloampeerin tuntumaan. Energiämäärät erimerkkisillä salamoilla ovat tosin samaa suuruusluokkaa, sillä peräti 90 % positiivisista on yksinkertaisia, ja yli kolminkertaisia on aniharvoin: positiivisten salamoiden kerrannaisuus on keskimäärin vain 1,1 – 1,2. Negatiivisista taas suunnilleen puolet on yksinkertaisia, neljäsosa kaksinkertaisia, 1/8 tai hieman enemmän kolminkertaisia jne., ja keskimääräinen kerrannaisuus on kahden paikkeilla tai vähän yli. Yli kymmenkertaisia negatiivisia salamoita havaitaan Suomessa vuosittain 10-20 ja satunnaisesti jokin positiivinenkin.

Negatiivisten salamoiden kerrannaisuus pyrkii pysyttelemään ykkösessä samantapaisissa tilanteissa kuin positiivisia salamoita esiintyy, eli kun salamointi on hajanaista (varsinkin keväällä ja syksyllä) tai kun aktiivisempi ukonilma on alkamassa tai loppumassa. Negatiivisten salamoiden kerrannaisuus on suurimmillaan kovan keskikesän ukonilman kypsässä vaiheessa.

4.6 Ukkosen jyrinä

Pääsalaman edetessä salamakanavassa tämä kuumenee adiabaattisesti (ehtimättä luovuttaa lämpöä ympäristöön) 20 000 – 30 000 asteeseen, mikä aiheuttaa nopean laajenemisen. Laajenemisnopeus on suunnilleen 3 km/s, joka on moninkertainen verrattuna äänen nopeuteen normaalitilaisessa ilmassa (343 m/s +20°C lämpötilassa) mutta pieni verrattuna pääsalaman etenemisnopeuteen (100 000 km/s). Sähköinen purkaus on siis jo ohi, kun kuuma salamakanava aloittaa laajenemi-

Pääsalaman nopeus	100 000 km/s
huippuvirta	30 kA (posit. 60 kA)
kesto (1/2 huipusta)	40 μ s (posit. suurempi)
neutraloima varaus	2,5 C

Jatkuva virta pääsalamoiden välillä (puolet moninkertaisista salamoista):

kesto	0,15 s
varaus	10 C

Pilvisalaman kesto	0,5 s
Alkupurkauksen (soihstupurkauksen)	
kesto	0,25 s
neutraloima varaus	10 C
nopeus	10 km/s

Rekyylipurkauksen kesto	1 ms
nopeus	1000 km/s
Rekyylipurkausten aikaväli	25 ms
lukumäärä	10
neutraloima varaus	10 C

Lokero 4.4. Ukkospilven sähkötalous

Vaikka liitteessä B.4-B.5 selostetaan ukkospilvien osuutta maapallonlaajuisen ilmasähkövirtapiirin generaattorina, havainnollistetaan tässä suuresti yksinkertaistetun esimerkin valossa ukkospilven varauksia ja sähkövirtoja ja salamoiden merkitystä niiden kannalta. Liitteessä B.6 esitetty ukkossolun varautumismalli kuvaa pilven yhden konvektiosolun mekanismeja. Tässä kuvattu ukkospilvi koostuu monesta solusta, jotka yhdessä pystyvät tuottamaan oletetut salamamäärät.

Oletetaan, että salamat ovat pilvisalamoita ja negatiivisia maasalamoita, joista kukin neutraloi 17 C varausta (maasalama sisältää keskimäärin 2 pääsalamaa, joista kummankin varaus on 2,5 C; esisalaman varaus on 5 C ja nuolisalaman 1 C; puolet maasalamoista sisältää 12 C jatkuvan virran osuutta, siis keskimäärin 6 C). Pilven sähkönjohtavuudeksi oletetaan $\sigma = 10$ fS/m, mikä merkitsee, että pilvessä oleva varaus hajoaa ympäristöön nopeudella, jota kuvaa aikavakio $\tau = \epsilon_0/\sigma = 885$ s (ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys, ks. liite H).

Pilven varautumiskykyä kuvaa vakiosähkövirta I ; se kasvattaa varauskeskuksia vakionopeudella, kunnes salama tyhjentää ne äkillisesti aina ajan

T kuluttua. Salamoiden välillä varaus q noudattaa differentiaaliyhtälöä (t on aika)

$$dq/dt = I - q/\tau$$

eli varauksen muutosnopeuteen vaikuttaa varautumisvirta I kasvattavasti ja johtuminen ympäristöön vähentävästi. Yhtälön ratkaisu aikavälillä $(0, T)$ on

$$q = I\tau(1 - \exp(-t/\tau))$$

joka on melkein lineaarisesti kasvava, kun $T \ll \tau$, ja peräkkäisten T :n pituisten aikavälien kuvaaja on sahanteräinen funktio.

Oletetaan, että pilven elinaika on yksi tunti, jonka aikana se tuottaa 200 (negatiivista) maasalamaa ja 400 pilvisalamaa. Negatiivinen keskus purkaustu silloin keskimäärin $T = 6$ sekunnin välein ja positiivinen keskus $T = 9$ sekunnin välein. Negatiivisen varauksen kasvaminen 6 sekunnin aikana 17 coulombiin edellyttää, että varausvirta on $I = 2,84$ A. Salamat kuluttavat negatiivista varausta nopeudella 17 C / 6 s = $2,83$ A, joten varauksesta ehtii vuotaa ympäristöön vain 0,01 A.

Positiivinen varauskeskus salamoi harvemmin, joten sen varaus ehtii salamoiden välillä kasvaa arvoon 25,4 C. Pilvisalama kuluttaa tästä 9 sekunnissa vain 17 C, siis 1,89 A, joten pilven yläosan vuotovirta on peräti 0,95 A. Negatiivisen varauksen vuotovirta neutraloi tästä vain vähäisen osan, joten pilven yläosasta nousee yläilmakehään yhden ampeerin suuruusluokkaa oleva virta.

Elinaikanaan pilvi tuottaa noin 10 000 C (= 600·17 C) varausta, mutta siitä on kerrallaan vain pieni osa erottuneena, siinäkin tapauksessa, että salamoiden kuluttaman 17 C:n lisäksi pilveen jää aina jonkin verran neutraloitumattomaa varausta. Jännite U varausten välillä on 100 MV:n luokkaa, eli 4 km etäisyyksillä sähkökentät ovat luokkaa 25 kV/m. Pilven sähköteho UI , joka on pieni osa sen termodynaamisesta tehosta, on 200-300 MW ja energiankulutus tunnin aikana 200-300 MWh. Jos yksi talous kuluttaa 10 kW, jatkuva ukkonen vastaisi pikkukaupungin kulutusta. Maasalaman keskienergia qU on noin 500 kWh eli parin talouden vuorokausikulutus.

Mielenkiintoisena vertailukohtana voidaan todeta, että 60 ampeeritunnin lyijyakkua tuottaa varausta peräti 200 000 C eli moninkertaisesti sen mitä ukkospilvi. Varaus ei ole kuitenkaan vapaana, vaan purettaessa kemiallinen reaktio pystyy tuottamaan sitä vain nopeudella, jolla saavutetaan 12 V:n jännite ja enintään muutaman sadan ampeerin virta. Matalan jännitteen takia energia jää alle yhteen kilowattituntiin. Salaman mahti piilee siis korkeissa jännitteissä eikä suurissa sähkömäärissä.

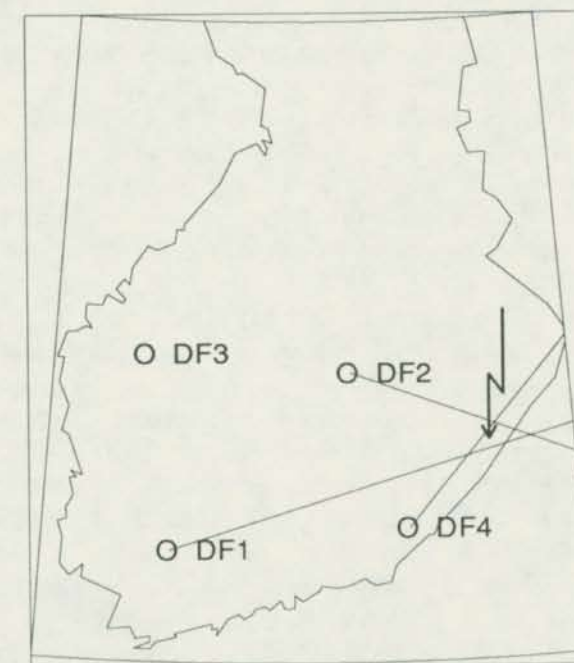
5 Ukkosten esiintyminen Suomessa

Vaikka Suomi ei pohjoisen sijaintinsa takia ole kaikkein ukkosaktiivisimpia seutuja, aikaansaava vaihteleva, matalapaineiden hallitsema ilmastomme meilläkin kesäaikaan ukkosjaksoja, joiden salamamäärät ovat toisinaan huomattavia. Myös voimakas vuodenaikojen vaihtelu tuo ukkosiimme omat erityispiirteensä. Koska salamoiden aiheuttamat vahingot ovat meillä merkittävä taloudellinen tekijä, Suomen ukkosten ominaisuuksien tutkiminen on perusteltua ei vain ilmastollisena ja säätekijänä, vaan myös vahinkoriskien kannalta.

5.1 Salamoiden havainnointi

Salamoiden järjestelmällinen havainnointi on useimmissa maissa sääpalvelua antavan laitoksen vastuulla. Ilmatieteen laitos käyttää (v:sta 1887 lähtien, ks. Oksanen, 1940; Ukonilmat Suomessa 1887-1906) yhtenä säähavaintosuurena *ukkospäivälukua* eli niiden päivien lukumäärää, joina havaintoasemalta käsin on näkö- ja kuulohavainnoin todettu ukkosta esiintyvän ympäristössä. Ukkospäiväluvun puute on, että siihen ei sisälly suoraan tietoa salamoinnin määrästä.

Ensimmäinen askel näkö- ja kuulohavaintojen korvaamiseksi tai täydentämiseksi siten, että ukkospäivien lisäksi saadaan tieto salamamäärästä, oli *salamalaskijoiden* käyttö. Salamalaskija on antenniin liitetty laskuri, joka antaa sykäyksen, kun pilven negatiivisen varauskeskuksen sähkökenttä maanpinnalla havaittuna muuttuu jyrkästi salaman neutraloidessa varausta (ks. Tuomi, 1987). Sykäyksiä aiheuttavat negatiivisten maasalամoiden lisäksi jonkin verran myös pilvisalamat sekä joskus muut kuin salamaperäiset radiohäiriöt, ja esimerkiksi salamavahingon tunnistamiseksi olisi pystyttävä erottamaan nämä toisistaan. Sopivilla säädöillä voidaankin osa pilvisalamoista eliminoida, mutta näyttää siltä, että niitä on aina tuloksissa mukana. Salamalaskija on parhaimmillaan paikallisessa havainnoinnissa, samantyyppisessä kuin näkö- ja kuulohavainnointikin, ja sen herkkyyden tulisi vastata samaa havaintosädettä eli noin kahtakymmentä kilometriä.



Kuva 5.1. Salamanpaikantimen suuntimisasemat (DF, Direction Finder) Suomessa 1992. Jokaisesta on kiinteä tiedonsiirtoyhteys keskusyksikköön, joka on Ilmatieteen laitoksella Helsingissä. Paikannukseen riittää kahden suuntiman leikkauspiste. Useamman suuntiman (kuvassa kolmen) leikkauspisteiden hajonta antaa käsityksen paikannuksen tarkkuudesta.

Suomessa on salamalaskijahavaintoja tehty systemaattisesti koko maan alueella vuosina 1960-1988, jolloin kesäisin (touko-syyskuussa) on ollut toiminnassa muutama kymmenen laskijaa. Niitä ovat hoitaneet lähinnä säähavaintoasemien sekä voima- ja teleyhtiöiden henkilökunnat. Rekisteröidyt salamamäärät on pyritty lukemaan päivittäin. Lähes 30 vuoden tuloksista on saatu peruskäsitys Suomen ukkosilmastosta näkö- ja kuulohavaintojen ohella, vaikka laskijaverkko ei ole kattanut maata tasaisesti eikä kaikilla asemilla ole voitu taata samanlaisia havaintolosuhteita, esimerkiksi tarpeeksi vapaata horisonttia. Ongelmia ovat tuottaneet myös muut kuin maasalamoista peräisin olevat sykäykset sekä epävarmuus laskijoiden havaintosäteessä ja sitä kautta rekisteröintimäärien muuntamisessa salamatiheyksiksi. Tiedonkeruun hitauden takia salamalaskijatuloksia ei ole voitu käyttää päivittäisissä sääennustuksissa, paitsi paikallisina varoittimina esimerkiksi lentokentillä. Yhteenvetotuloksia esitetään kohdissa 5.2 ja 5.3.

On tiedetty kauan, että salamoiden aiheuttamat radiohäiriöt (*radioukkoset*) ete-

nevät havaittavina pulsseina jopa tuhansia kilometrejä maanpinnan ja ionosfäärin välisessä tilassa (liite C.4). Niiden erottaminen muusta radioaaltohälystä ei ole aivan helppoa. Jos kuitenkin etäisyys salamasta on enintään muutama sata kilometriä, maasalammalle ominainen pulssimuoto (ks. liite C.3) säilyy suhteellisen hyvänä ja mahdollistaa sen tunnistamisen. Radioukkosen sähkömagneettisen kentän magneetti- ja sähkökenttäkomponentit mittaamalla on mahdollista määrittää suunta, jossa salama iski (lokero 5.1). Kun suuntiminen suoritetaan kahdesta eri paikasta, saadaan salaman paikka suuntien leikkauspisteenä. Tämän periaatteen soveltaminen yhdistettynä maasalaman pulssimuodon tunnistamiseen johti 1970-luvulla USA:ssa *salamanpaikantimen* kehittämiseen (Krider & al., 1976); tuloksena oli kaupallisesti tarjolla oleva laitteisto, jollainen on tällä hetkellä monissa maissa eri puolilla maapalloa. Ilmatieteen laitos osti Suomeen salamanpaikantimen vuonna 1984, aluksi kahteen ja nykyään neljään suuntimisasemaan perustuvana (kuva 5.1). Suuntimisaseman n. 400 km:n havaintosäde käytetään hyväksi niin, että asemat on sijoitettu Etelä- ja Keski-Suomeen suunnilleen neliöksi, jonka sivu on 250 km. Laitteiston ulottaminen kattamaan myös Lappi ehkä kahdella lisäasemalla tapahtunee 1990-luvun puolivälissä.

Salamanpaikannin toimii reaaliaikaisesti, ts. tieto salamasta saadaan välittömästi. Käytännössä Ilmatieteen laitoksen paikannin merkitsee havaitun salaman iskupaikan saman tien karttapohjalle, joka voidaan vaihtaa halutuvin välein. Näyttö tietokoneen kuvaruudulla olisi myös haluttaessa mahdollista. Joka tapauksessa päivystävät meteorologit voivat seurata salamoinnin kehittymistä ja käyttää tietoa muiden säähavaintotietojen, kuten säätutka- ja satelliittikuvien tukena. Viimeksi mainituista voidaan helposti erottaa kuuro- ja ukkospilvet mutta ei niiden salamointia. Paikannustiedot tallentuvat automaattisesti tietokoneelle jälkikäteen tapahtuvaa analysointia ja tilastointia varten. Paikannustietojen laadun tarkastaminen edellyttää tiettyä jatkuvaa tutkimuspanosta, jolla pyritään selvittämään erilaiset virheet ym. puutteet.

Toinen varsin laajoja markkinoita saavuttanut salamoiden paikannusmenetelmä perustuu aikaan, joka radioukkoselta kuluu salaman ja havaintoaseman väliseen matkaan (Bent & Lyons, 1984; lokero 5.2). Yksi laitteiston mutta ei itse menetelmän puute on, että pulssimuotoon perustuvaa pilvisalamoiden eliminointia ei voida käyttää, koska suuntimismenetelmän kehittäjä on patentoinut sen.

Lokero 5.1. Salaman suuntiminen

Pääsalaman iskiessä on salamakanava ainakin maanpuoleisessa päässä jokseenkin pystysuora, joten siinä kulkeva sähkövirta synnyttää sähkömagneettisen kentän, jonka sähkökenttä on pystysuora ja magneettikenttä vaakasuora; kentän sanotaan sähkökentän mukaisesti olevan pystypolaroitunut. Magneettikenttä voidaan mitata pystysuorassa tasossa olevalla kehäantennilla, johon indusoituu sähkövirta. Jos kehäantenneja on kaksi toisiaan vastaan kohtisuorassa (esim. pohjois-etelä- ja länsi-itäsuunnassa), voidaan niihin indusoituneiden virranvoimakkuuksien suhteesta laskea magneettikentän suunta, joka puolestaan on kohtisuorassa signaalin tulosuuntaa vastaan.

Jos magneettikentän itseisarvo on B ja signaalin suuntakulma ψ , ovat antenneista saatavat jännitteet verrannollisia komponentteihin $B\cos\psi$ ja $B\sin\psi$. Suhteesta saatavan ψ :n tangenttifunktion jakso on 180° , joten ψ :n yksikäsitteiseen määrittämiseen koko 360° suuntima-alueella tarvitaan vielä sähkökenttä, jolla on magneettikenttään nähden vaihe-ero. Suunnan määrittämiseen voidaan käyttää joko yksittäisiä taajuuskomponentteja tai ajallista pulssia. Taajuuskomponentteja käytetään ns. VHF-interferometriaan perustuvassa paikannuksessa (liite C.4). Pulssimenetelmä on käytössä salamanpaikantimessa, jossa samalla testataan, onko pulssimuoto pääsalammalle ominainen. Suuntimisen tarkkuus riippuu silloin siitä, kuinka hyvin pulssin korkeus pystytään mittaamaan kustakin komponentista. Vääristymiä voivat aiheuttaa mm. lähellä iskevän salaman muut kuin säteilykentän komponentit (liite C.2) ja kaukana iskevän salaman signaalin ionosfääristä heijastunut osuus, joka osaltaan vaikuttaa havaintosäteen rajoittumiseen n. 400 km:iin (liite C.4).

Käytännössä on osoittautunut, että suuntimisaseman mittaamassa tulosuunnassa voi olla suuriakin, 10° luokkaa olevia virheitä, jotka todennäköisesti aiheutuvat aseman lähellä olevista maaston epätasaisuuksista ja rakennuksista, sähkölinjoista jne. Onneksi pääosa virheistä on systemaattisia, eli kullekin suunnalle on sille ominainen, vakiona pysyvä virhe. Systemaattiset suuntavirheet voidaan määrittää melko luotettavasti, jos saman salaman havaitsee vähintään 3 suuntimisasemaa ja tällaisia havaintoja on runsaasti kaikissa suunnissa. Vaikka suuntimiseen perustuvaan paikannukseen periaatteessa riittää kaksi suuntimaa, kolmannen tai useamman suuntiman tuomat ylimääräiset leikkauspisteet eivät yleensä sijoitu samaan kohtaan; niiden hajonnasta voidaan päätellä paikannuksen tarkkuus ja etsiä systemaattiset virheet. Suomessa on systemaattisten korjausten ansiosta virhe parhaalla havaintoalueella (Häme, Keski-Suomi) n. 5 km ja sen reunoilla ehkä 10 km.

Systemaattisten virheiden ohella suuntimiseen sisältyy aina satunnaisvirheitä, joita aiheuttavat mm. edellä mainitut pulssimuodon vääristymät. Käytännössä niiden suuruus voi olla jopa muutamia asteita.

Pulssimuototarkastelussa (liite C.3) todetaan, että kaikki maasalamat eivät tule suuntimisaseman hyväksymiksi, koska niiden pulssimuoto poikkeaa liiaksi tyypillisestä. Tämän lisäksi näyttää siltä, että hyväksymiseen

vaikuttavat myös satunnaistekijät, joiden luonnetta on vaikea selvittää. Säännönmukaisesti käy niin, että jokin suuntimisasema voi hyväksyä pulssin, mutta toinen ei, vaikka ne ovat peräisin samasta salamasta. 400 km nimellisen havaintosäteen sisälläkin kukin suuntimisasema havaitsee vain 50-80 % sellaisista maasalamoista, joiden pulssimuoto täyttää hyväksymiskriteerit. Suuntimisaseman havaitsemistodennäköisyyttä voidaan kuvata etäisyydestä r riippuvalla funktiolla

$$p(r) = 0,80 \exp(-(r/r_0)^2)$$

jossa $r_0 = 400$ km on nimellinen havaintosäde; se voi vaihdella hieman eri suunnissa riippuen maastosta. Suuntimisasemien todennäköisyydet yhdistetään koko paikantimen havaintotehokkuudeksi, joka parhaalla havainto-alueella on n. 77 % ja sen reuna-alueilla alle 50 % (Tuomi, 1990, 1992).

Lokero 5.2. Aikaeroon perustuva salamanpaikannus

Suuntimisen ohella salaman paikantaminen voi perustua myös aikaan, joka signaalilta kuluu sen edetessä salamasta eri havaintoasemille. Signaali kulkee valon nopeudella (300 000 km/s), siis 300 m mikrosekunnissa. Jos ajat mitataan kahdella asemalla, aikojen ero määrää hyperbelin, jolla salama sijaitsee. Jos ajan mittaa myös kolmas asema, saadaan paikka hyperbelien leikkauspisteenä. Käytännössä tyydyttävään tarkkuuteen Suomen eteläpuoliskon kokoisella alueella tarvitaan 4-5 havaintoasemaa. Tällaista aikaeropaikanninta valmistetaan USA:ssa kuten suuntimisaikapaikannintakin, ja niitä on USA:n lisäksi käytössä useissa maissa. Tätä kirjoitettaessa suuntimisaikapaikannin on markkinoissa kilpailijansa edellä.

Aikaeropaikannuksen tarkkuuteen vaikuttaa, miten hyvin pystytään mittaamaan signaalin saapumishetki havaintoasemalle. Pääsalamapulssissa lyhin helposti erotettava piirre on sen nousu, joka kestää muutaman mikrosekunnin, ja hyvin järjestetyllä mittauksella siitä voidaan saada aika lähes mikrosekunnin tarkkuudella. Tätä varten on jokaisella havaintoasemalla oltava tarkasti synkronoitu aika, jonka saaminen ei nykyään ole suuri ongelma (suuntimisaikapaikannuksessa tarvitaan vain noin millisekunnin tarkkuutta).

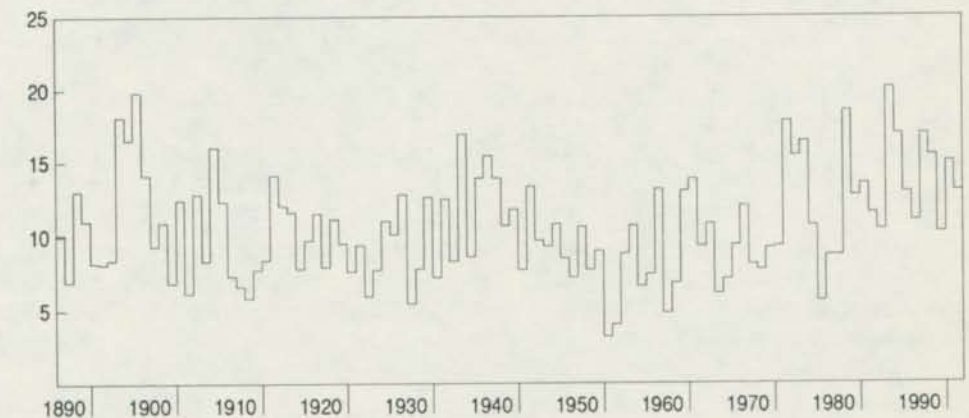
Aikaeron laskeminen ei ole yhtä altis maastosta johtuville virhelähteille kuin suuntimien määrittäminen, mutta käytännössä järjestelmä yltää muutamien kilometrien paikannustarkkuuteen kuten kilpailijansakin.

5.2 Ukkospäivät

Kun halutaan luoda katsaus salama-aktiivisuuteen pitkällä aikavälillä, ainoa käytökelpoinen suure on toistaiseksi ukkospäiväluku, josta Suomessa on järjestelmällisiä havaintoja vuodesta 1887 (Oksanen, 1940; Ukonilmat Suomessa 1887-1906). Jos havaintopaikalla vuorokauden aikana ainakin kerran kuullaan ukkosen jyrinää ja/tai nähdään salama, on kyseessä ukkospäivä. Havaintosäde on 20 km luokkaa (vrt. kuva 4.5). Lappiin perustettiin pysyviä havaintoasemia muuta Suomea hiitaammin, ja pitkäaikaiset tiedot koskevatkin lähinnä eteläpuoliskoa. Kuvassa 5.2 näkyy ukkospäiväluku, joka on sopivan havaintoasemaotoksen keskiarvo, vuosina 1887-1992. Salamanpaikannintulokset osoittavat, että vaikka ukkospäivien salamamäärät voivat vaihdella runsaastikin, on vuotuinen salamatiheys n (maahan iskevien salamoiden määrä sataa neliökilometriä kohti) Suomen eteläpuoliskossa keskimäärin

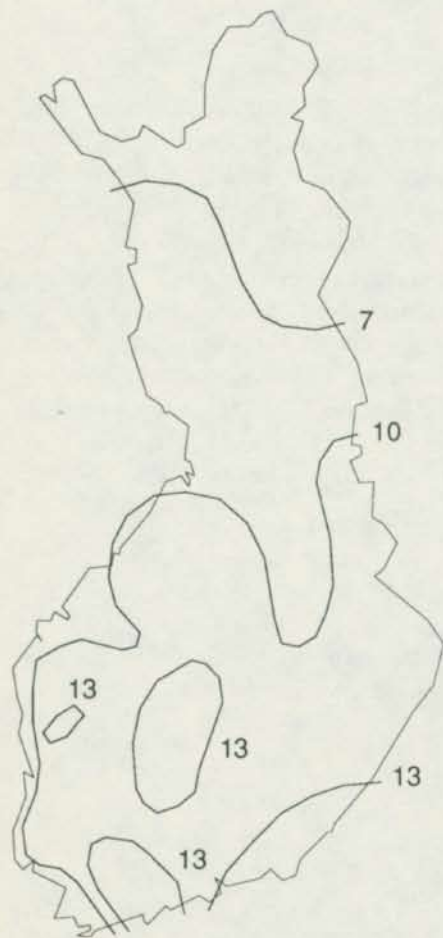
$$n = 0,25 T^{1,7}$$

kun T on ukkospäivien lukumäärä. 10 ukkospäivää merkitsee siis n. 13 salamaa/100 km². Yksittäisinä vuosina poikkeamat tästä voivat olla suuriakin.



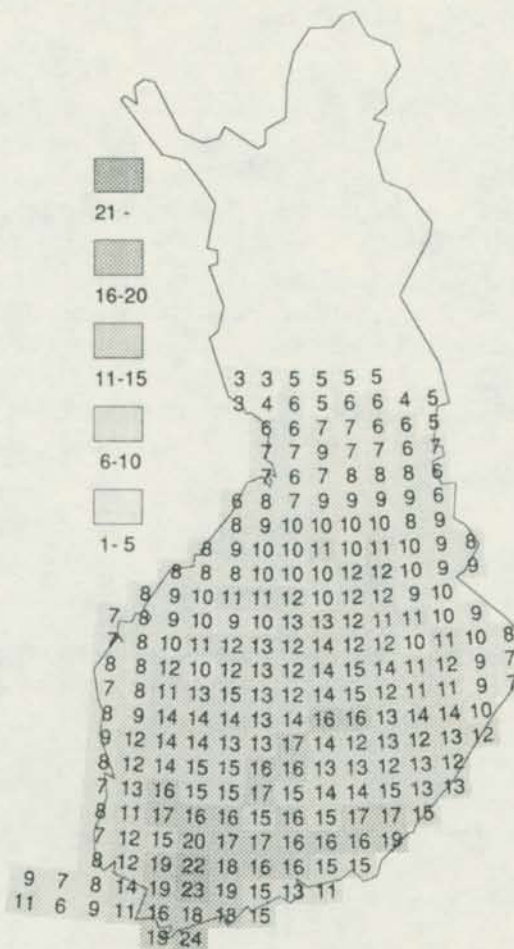
Kuva 5.2. Suomen eteläpuoliskon ukkospäiväluvut vuosina 1887-1992.

Ukkospäivien alueellisesta jakautumisesta on tietoa vuodesta 1887 lähtien (Oksanen, 1940). Salamanlaskijahavainnot vuosilta 1961-1980 (Laitinen, 1985) antavat olennaisesti saman tuloksen lukuunottamatta vähäisiä paikallisia eroja. Yhteensopivuus näyttäisi kuitenkin edellyttävän, että salamanlaskijoilla havaittu



Kuva 5.3. Salamanlaskijatuloksiin perustuvat keskimääräiset ukkospäiväluvut vuosina 1961-1980. Alkuperäiset luvut on jaettu tekijällä 1,5.

ukkospäiväluku on jaettava tekijällä 1,5 (Tuomi, 1992; vrt. Laitinen, 1974). Kuvassa 5.3 näkyvät tällä tekijällä korjatut keskimääräiset salamanlaskijaukkospäivät vuosina 1961-1980 (Laitinen, 1985) ja kuvassa 5.4 salamanpaikantimella havaittujen ukkospäivälukujen keskiarvot vuosina 1987-1992. Useimmin, noin 20 päivänä vuodessa, ukkostaa maan lounaisosassa; Lapissa tyypillinen lukumäärä on 5. Paikanninukkospäivät ovat kuukausittaisena taulukkona liitteessä E, jossa on myös selitetty kuvien 5.4 ja 5.6 kartan ruutujako.



Kuva 5.4. Salamanpaikannustuloksiin perustuvat keskimääräiset ukkospäiväluvut vuosina 1987-1992. Kartan ruutujako on selostettu liitteessä E.

Vaikka yhteen havaintopaikkaan liittyviä ukkospäiviä on harvoin enemmän kuin 25, esiintyy koko maan alueella ukkosta paljon useammin, keskimäärin 90 päivänä kesässä. Jos maa jaetaan kuviteltuja havaintopaikkoja vastaaviin ruutuihin, kuten kuvassa 5.4 on tehty, on esiintymispäivänä ukkosta keskimäärin 29 ruudussa. Kun keskimääräisenä kesänä maan eteläpuoliskossa esiintyy 40 000 maasalamaa, niitä on 440 salamaa esiintymispäivää kohti ja 15 salamaa esiintymispäivää ja ruutua kohti. Kun ruutuja tarkastelussa on 238, antaa suhde $29/238 = 0,12$ ($= 12\%$) todennäköisyyden, että yhtenä esiintymispäivänä (90:stä) salamoita esiintyy tietyssä ruudussa. Kun tämä kerrotaan esiintymispäivien määrällä, saadaan tyypilliseksi ukkospäiväluvuksi 11.

90:stä koko maata käsittävästä ukkosten esiintymispäivästä on vain kymmenkunta sellaisia, joihin salamoita on merkittävästi (1000 tai enemmän) ja maamme jossakin kolkassa koetaan kova ukonilma, ja todella runsaita ukkosia (salamoita 5000 - 10 000) on 1 - 3 päivänä kesässä.

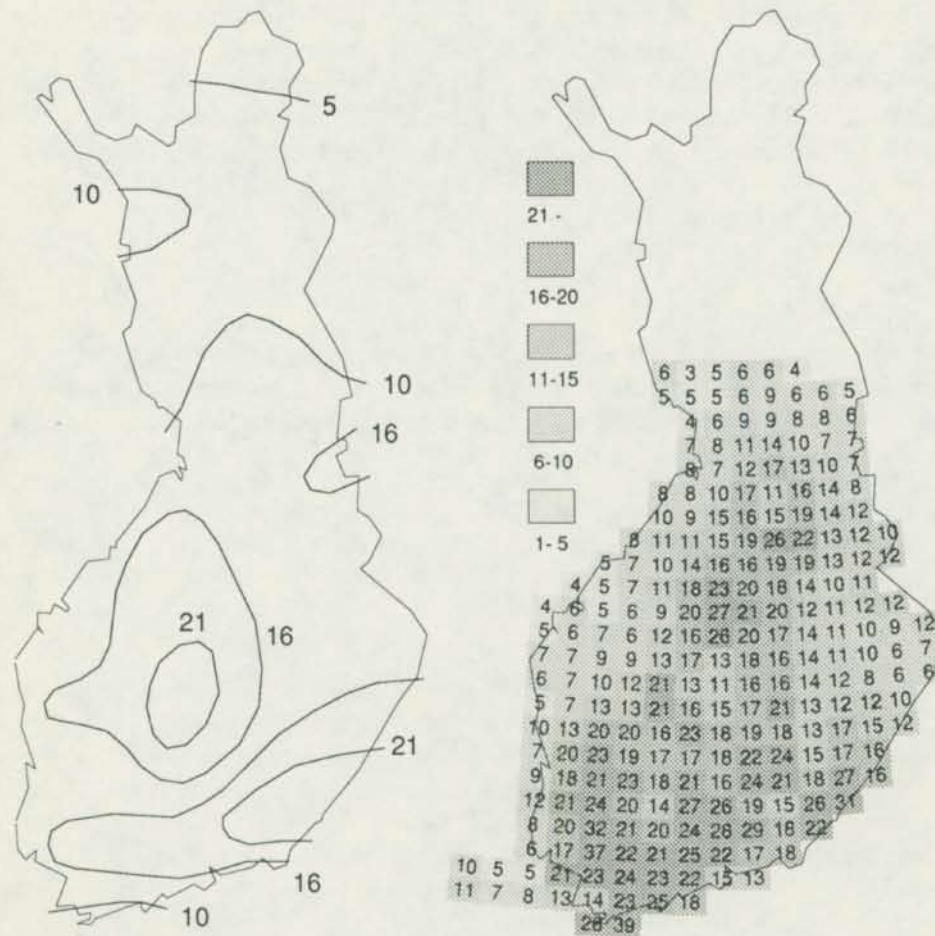
5.3 Salamamäärät ja -tiheydet

Ensimmäiset suhteellisen luotettavat tulokset maasalamoiden määristä Suomessa saatiin salamanlaskijoilla vuodesta 1960 lähtien. Yhteenvedon vuosilta 1961-1980 on julkaissut Laitinen (1985). Salamanpaikannin on toiminut tyydyttävällä havaintotehokkuudella (vähintään kolmella suuntimisasemalla) vuodesta 1987 lähtien. Laskijoiden ja paikantimen vertailu (Tuomi, 1992) viittaa siihen, että salamanlaskijan rekisteröintimäärä pitää jakaa luvulla 95, kun halutaan salamatiheys (100 km² kohti). Näin korjattu keskimääräinen salamatiheys vuosilta 1961-1980 on kuvassa 5.5. Vuosien 1987-1992 paikannustulosten keskiarvot (100 km² kohti) ovat kuvassa 5.6. Nämä luvut on myös korjattu todellisiksi maasalamoiden tiheyksiksi ottamalla huomioon paikantimen havaintotehokkuus. Samat tulokset on annettu taulukossa suoraan salamamäärinä (ei pinta-alaa kohti) liitteessä E.

Keskimääräisenä kesänä Suomen eteläpuoliskossa — pinta-alaltaan runsas 2/3 Suomen manneralueesta eli noin 250 000 km² — iskee maahan 40 000 salamaa. Lapin vajaan 100 000 km² alueella on salamanlaskijatuloksista päätelty salamatiheys 5-10 sal./100 km² eli salamoiden määrä on siellä arviolta 5000 - 10 000.

Vilkkaimpia salamaseutuja ovat Uudenmaan länsiosa, Salpausselän alue, Häme ja Keski-Suomi, missä salamatiheys on luokkaa 25 salamaa/100 km². Pohjanmaan rannikkoseutu jää tiheydessä melkein pä Etelä-Lapin tasolle.

Kuvan 5.6 tiheyksien vaihteluista ruudusta toiseen ei pidä päätellä, että esim. aivan Keski-Suomessa oleva vähäsalamainen ruutu (tiheys 11) olisi salama-alttiudeltaan ympäristöstään poikkeava. Vaikka näin voi olla, ovat sään ja sen mukana ukonilmojen vaihtelut vuodesta toiseen niin suuria, että kuuden vuoden



Kuva 5.5 Salamanlaskijoilla havaitut keskimääräiset salamatiheydet (sataa neliökilometriä kohti) vuosina 1961-1980. Tiheydet on laskettu jakamalla lasketut määrät luvulla 95.

Kuva 5.6. Paikannettujen salamoiden tiheydet (sataa neliökilometriä kohti) keskimäärin vuosina 1987-1992. Luvut on korjattu vastaamaan todellista maasalամoiden määrää. Kartan ruutujaon selostus ja pinta-alalla jakamattomat salamamäärät ovat liitteessä E.

aineisto ei riitä "suodattamaan" esiin tämän mittakaavan todellisia ilmasto- tai maastotekijöitä. Sellaiset näkyvät pikemminkin kymmenen ruudun mittakaavassa tai sitä suuremmilla alueilla. Tarvittaneen ainakin 10-20 vuoden aineisto ennen kuin salama-alttiuden vaihteluista saadaan tietoa 10 kilometrin mittakaavassa.

Taulukossa 5.1 on yhteenveto salamanlaskija- ja paikannustuloksiin perustuvis-

ta salamatiheyksistä ja ukkospäivistä erikseen Etelä- ja Keski-Suomessa ja Lapissa. Luvut on korjattu vastaamaan todellisia arvoja v. 1992 käytettävissä olevien tietojen perusteella (Tuomi, 1992).

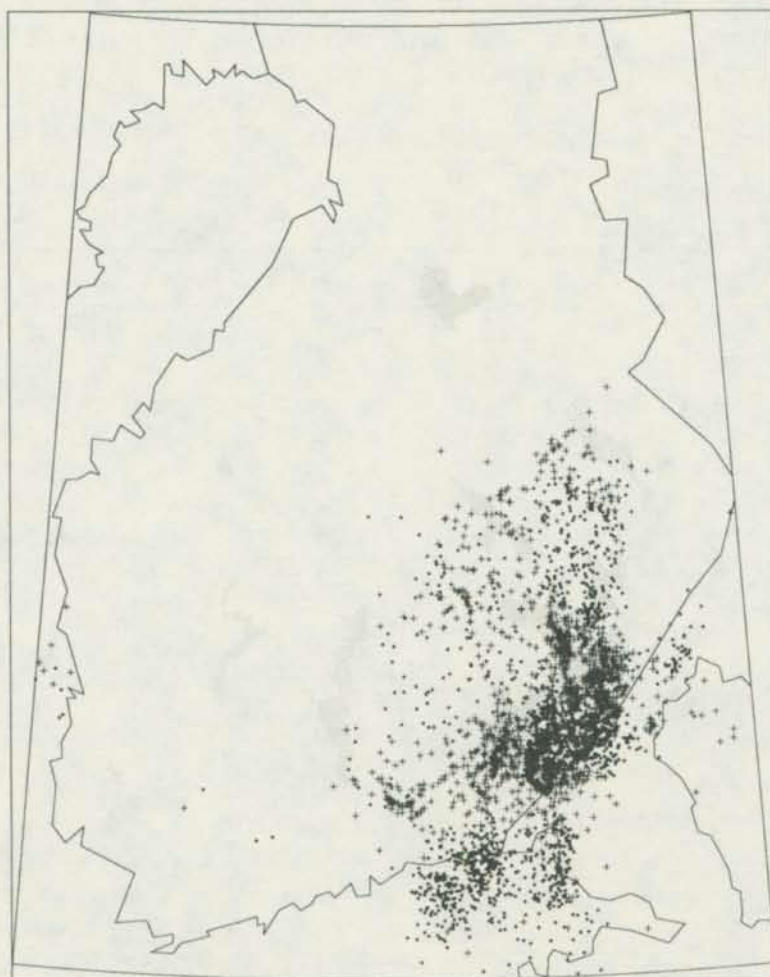
Taulukko 5.1. Salamatiheydet (n , 100 km² kohti) ja ukkospäivät (T) 1972-1992 Etelä- ja Keski-Suomessa (E) ja Lapissa (L). — : tiedot puutteellisia.

v.	n_E	T_E	n_L	T_L	v.	n_E	T_E	n_L	T_L	v.	n_E	T_E	n_L	T_L
72	40,3	18	33,0	11	79	20,3	19	17,0	13	86	8,0	10	3,6	5
73	31,8	15	13,8	9	80	19,3	13	9,2	9	87	7,2	11	3,0	3
74	24,1	16	16,3	13	81	—	14	—	—	88	36,8	18	10,9	9
75	13,8	11	6,9	8	82	15,2	12	4,8	6	89	12,7	13	8,8	6
76	8,3	7	4,3	5	83	13,2	9	3,6	5	90	6,6	13	1,8	5
77	16,5	11	11,7	7	84	19,4	18	14,8	13	91	18,0	15	3,1	7
78	15,6	11	1,8	3	85	17,3	13	14,2	8	92	17,5	13	8,6	8

5.4 Voimakkaat ukonilmat

Kesän ukkosjaksoista jäävät mieleen parhaiten tietenkin sellaiset, joissa ukkosalue on yhtenäinen ja salamointi on runsasta. Joskus tällainen alue syntyy vain yhdelle seudulle, mutta muutamana kovimpana kesän ukkospäivänä niitä esiintyy yleensä useammalla paikkakunnalla. Näin on asianlaita, jos laajalla alueella vallitsee ilmassaukkoselle otollinen säätila tai jos maan yli kulkee aktiivinen rintama. Voimakkaat ukonilmat erottuvat kesän hajaukkosten taustasta selvästi tiiviimpinä salamarykelminä. Seuraavassa pyritään antamaan kuva niiden tyypillisistä piirteistä kuten koosta, elinajasta ja salama-aktiivisuudesta.

Mielikuvan kovista ukkosista saa ehkä parhaiten tarkastelemalla vuosien 1987-1992 sellaisia ukkospäiviä tai 2-3 päivän yhtenäisiä jaksoja, jolloin koko Suomen eteläpuoliskossa on paikannettu n. 2000 salamaa tai enemmän. Tällaisia jaksoja on ollut mainitun 6 vuoden aikana 20 kpl eli keskimäärin noin kolme kesässä. Näiden jaksoiden salamat on piirretty erikseen kartalle liitteessä F. Havaitaan, että joinakin päivinä muodostuu eri puolille maata lähes paikallaan pysyviä ukkosalueita, ja toisinaan taas ukkoset muodostavat pitkiä jonoja, joista on helppo päätellä vallitsevan ilmapirtauksen suunta; se on hyvin usein lounaasta koilliseen. 24.-25.9.1989 salamat synnytti kylmä pisara, joka liukui troposfääriin yläosassa Perämereltä kaakkoon. Itse ilmassa maanpinnan lähellä oli lähes seisovaa (ks. kohta 2.2).



Kuva 5.7. Paikannetut salamat 29.6.1991 klo 3-9 Suomen kesäaikaa. Merkki (• ja +) vaihtuu tunnin välein; alue alkaa Suomenlahdelta ja etenee pohjoiseen.

Kuvassa 5.7 on osa vilkkaan ukkospäivän 29.6.1991 salamoista piirretty kuuden tunnin jakso (klo 3-9 Suomen kesäaikaa) kartalle siten, että salamaa kuvaava merkki vaihtuu aina tunnin välein; positiivisia ja negatiivisia maasalamoita ei tässä kuvassa erotella. Nähdään, että kokonaisuudessaan yhtenäinen ukkosalue koostuu ajallisesti ja paikallisesti toisiaan jatkuvasti seuraavista alueista. Paikallisemmissa, vähemmän liikkuvissa ukkosissa alue on samankokoinen kuin yhden tunnin alue kuvassa 5.7, ja salamamäärät ovat samaa luokkaa.

Paikallaan olevan tai hitaasti liikkuvan ukkosalueen halkaisija on 20-50 km, kun taas pitkulaisten, takareunasta häviävän ja etureunasta uusiutuvan liikkuvan alueen leveys on 10-50 km ja pituus 30-150 km (tyypillisesti 60 km). Karkeana keskiarvona voidaan sanoa, että voimakkaan ukkosen alue on kooltaan 40 km × 60 km oleva soikio ja se tuottaa tunnin aikana 250 maasalamaa eli 10 salamaa/100 km². Voimakkaimmissa ukkosissa alue pyrkii jäämään pienemmäksi (kapeammaksi) ja salamatiheys voi olla jopa 30 salamaa/100 km².

Vaikka kovassa ukkosessa, kun se osuu hyvin "kohdalle", saattaa tuntua että salamoita iskee vieri viereen, osoittautuukin että peräkkäiset salamat erittäin harvoin iskevät lähekkäin: vain 0,5 %:lla etäisyys on alle 2 km ja 1,5 %:lla alle 4 km. Peräkkäisten salamoiden keskietäisyys onkin peräti 20-25 km, eikä edes muutamien salamoiden odottelu tuo vielä uutta iskua lähelle. Salama siis tyhjentää tehokkaasti pilven varausta purkaukskohdasta. Lähekkäin (alle kilometrin etäisyydelle) iskevien salamoiden aikaväli on keskimäärin 7 minuuttia, joten maasalamoita ehtii tulla kolmisenkymmentä ennen kuin lähelle iskupaikkaa osuu uusi salama. Lopulta kuitenkin noin neljäsosa maahan iskeneistä salamoista on sellaisia, että kilometrin sisälle on iskenyt ainakin yksi muu salama.

5.5 Ukkoset muualla maapallolla

Ukonilmojen esiintymisellä eri puolilla maapalloa on selvä kaava: eniten ukkosia on tropiikin manneralueilla ja aktiivisuus heikentyy napoja kohti. Valtamerillä ukkosia on harvemmin, tosin tropiikin merillä aktiivisuus on merkittävää.

Ukkosten runsaus on suurinta alueilla, joilla pilvet kasvavat korkeimmiksi; ne tuottavat siten myös paljon pilvisalamoita. Pilvisalama-maasalamasuhteen ja ukkospäiväluvun välillä onkin havaittu yhteys. Taulukossa 5.2 on Suomen tietojen ohella maapallon eri seutuja kuvaavia lukuja (esim. Prentice, ks. Golde, 1977). Ne koskevat vain manneralueita. Valtamerillä on tropiikin seuduilla 10-20 ukkospäivää vuodessa, muualla vielä vähemmän (Israel, 1973, liite).

Taulukon 5.2 luvut perustuvat kirjajaan aineistoon — yhtenäisiä havaintoja ei ole olemassa — ja ovat erittäin epätarkkoja, ja niitä voidaankin pitää vain suuntaa-antavina, lähinnä luomaan käsitystä siitä, miten vilkasta ukkonilmojen ja salamoiden esiintyminen Suomessa on verrattuna muihin seutuihin. Vasta salamapaikantimien ja muiden luotettavien havaintomenetelmien yleistyminen tekee lähivuosina mahdolliseksi kartoittaa tarkasti ja alueellisesti vertailukelpoisella tavalla maapallon ukkosilmastoa. Kuvaavaa on, että esimerkiksi Suomessa salamanlaskija- ja paikannustulosten vertaaminen on ollut kaikkea muuta kuin suoraviivaista (Tuomi, 1990, 1992).

Kuten liitteessä B.5 todetaan, maapallolla on koko ajan käynnissä noin 1000

ukonilmaa, jotka vastannevat keskimäärin melko kovaa suomalaista ukonilmaa, mutta tuottavat enemmän pilvi- ja vähemmän maasalamoita. (Arviot ukonilmojen lukumäärästä ulottuvat 2000:een asti.) Jos pilvi saa aikaan yhden maasalaman minuutissa, 1000 ukonilmaa tuottaa niitä tuhat minuutissa eli 17 sekunnissa. Jos maasalamoita on keskimäärin viides- tai kuudesosa kaikista, maa- ja pilvisalamoita on koko ajan yhteensä suuruusluokkaa sata sekunnissa.

Koska maapallon ukkosten pääosa on tropiikin manneralueilla, aktiivisuudella on vuorokausivaihtelu, jonka aiheuttaa iltapäiväukkosten riippuvuus paikallisesta ajasta. Ukkostoiminnan minimi on Suomen ajassa aamuyöllä tai aamulla, jolloin Tyynellä valtamerellä on iltapäivä. Leveä ukkosmaksimi on iltapäivällä ja illalla Suomen aikaa, jolloin suurilla mantereilla (Asia, Afrikka, Amerikka) on iltapäivä. Mantereiden sijoittuminen päiväntasaajaan nähden aiheuttaa vastaavasti vuoden-aikavaihtelua. Molemmat vaihtelut havaitaan myös liitteessä B.5 mainitussa globaalissa sähkövirrassa.

Taulukko 5.2. Vuotuinen ukkospäiväluku (T), maasalamoiden tiheys (n , 100 km² kohti) ja pilvisalamoiden ja maasalamoiden lukumäärien suhde (s).

T	n	s	Tyypillisiä esiintymisalueita
10	13	1,5?	Keski-Suomi
15	25	2	Etelä-Suomi
25	110	2,5	Keski-Eurooppa, Venäjä
50	200	4	USA
100	500	6	Tropiikki (manner)

6 Salamavahingot ja suojautuminen

Salama on monessa suhteessa hyvin arvaamaton tapahtuma. Tosin sen keskimääräinen käyttäytyminen tunnetaan melko hyvin, mutta vaihtelut ovat suuria ja vaikeasti ennustettavia. Vaikka salamavahingot Suomessa ovat merkittäviä, ne ovat sen verran harvinaisia, että varautuminen riskeihin on usein puutteellista. Eräät periaatteet esim. ihmisten suojautumisessa ovat kuitenkin helposti ja ilman kustannuksia toteutettavissa; on myös syytä suojata alttiiksi osoittautuneita tai historiallisesti arvokkaita rakennuksia. Erityisen suurta huomiota ansaitsee nykyään herkkien tietojenkäsittely- ja tiedonsiirtolaitteiden suojaus salamaylijännitteiltä. Koska tämä kirja pyrkii antamaan lähinnä *yleistietoa* ukkosesta ja siihen liittyvistä ilmakehän ilmiöistä, ei tässä ole mahdollista paneutua syvemmin sähkö-, puhelin- ym. laitteiden suojauskysymyksiin, jotka vaativat teknistä erikoisasantuntemusta.

Vakuutuskorvattavia salamavahinkoja, lähinnä tulipaloja (n. 10 % kaikista paloista), sattuu Suomessa vuosittain pari tuhatta (ks. SESKO, 1983), ja vahingot ovat miljoonia markkoja. Pienempiä vahinkoja on todennäköisesti paljon. Lisäksi ukonilmoihin liittyviä vahinkoja aiheuttavat voimakkaat tuulet (ukkospuuskat) lähinnä metsätuhoina, sekä ukkospilvien rankat vesi- ja raekuurot. Yhteenvedon salamavahingoista vuosina 1887-1940 on julkaissut Oksanen (1940). Joitakin sanomalehti uutisiin perustuvia kuvauksia salamavahingoista on liitteessä G. Salaman aiheuttamia puustokuolemia on myös tutkittu (Nuorteva, 1990).

6.1 Mihin salama iskee?

Kuten edellä on todettu, maasalama alkaa tavallisesti pilvestä lähtevällä esisalamalla. Jos esisalama alkaa maasta, lähtöpaikka — ja iskupaikka — on tavallisesti korkean maston huippu, eikä salamasta ole vaaraa esim. ohikulkijoille. Salamasuojaus on otettu huomioon jo maston suunnittelussa, eikä sellaista tapausta ole syytä käsitellä tässä enempää.

Kun pilvestä alkava esisalama harhailee kohti maata, se ei pysty indusoimaan

maasta ylöspäin etenevää vastasalamaa ennen kuin se on saapunut noin sadan metrin korkeudelle. Kysymys voi olla mistä tahansa esisalaman haarasta, joita saattaa ulottua kauaskin vaakasuoraan esisalaman lähtöpaikasta, ja lopullinen iskupaikka määräytyy hyvin myöhäisessä vaiheessa. Iskupaikkoja voi olla kaksi tai useampia, jos ensimmäisen pääsalaman jälkeinen nuolisalama aktivoi eri haaran kuin alkuperäinen esisalama.

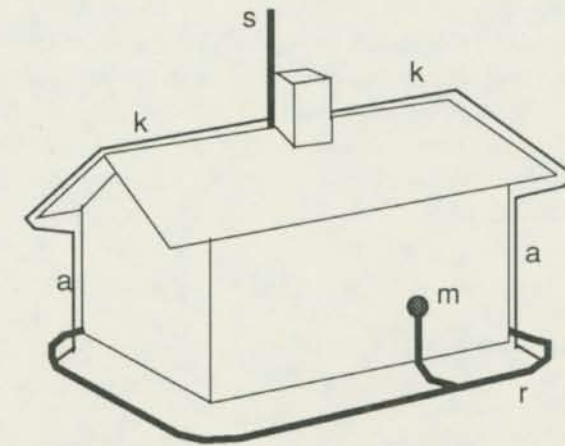
Vastasalaman syntypaikan valintaan vaikuttaa se, kuinka voimakkaan sähkökentän esisalaman kärjen jännite pystyy siihen indusoimaan ja kuinka nopeasti sähkökenttä kykenee kasvamaan. Edellinen ehto on puhtaasti geometrinen; mitä terävämpi kärki, sitä voimakkaampi sähkökenttä, jos kärkeen pääsee nopeasti sähkövarausta. Tämä jälkimmäinen ehto taas riippuu siitä, miten hyvin kärki johtaa sähköä ja millainen yhteys sillä on siihen vastakkaisen varauksen alueeseen, jonka pilven varausalue on maahan laajemmassa mitassa indusoinut. Salaman "tarkoitus" on neutraloida nämä alueet keskenään ja se pyrkii tekemään sen helpointa ja nopeinta tietä — mikä ei aina vaikuta ilmeiseltä, kun seuraa salaman tuhareittejä.

Vastakkaisen varauksen alue syntyy maahan helpoimmin kohtiin, joissa sähköjohtavuus on paras, eli käytännössä kosteaan maahan (sateen kastelemaan maanpintaan, pohjaveteen tai avovesistöön). Koska iskukohta ratkeaa vasta esisalaman loppuvaiheessa, voi reitistä kohti neutraloivaa varausta muodostua hyvinkin mutkikas, varsinkin jos tielle sattuu sähköjohtoja, metalliesineitä ym. Seuraavanlainen tapahtumasarja on täysin mahdollinen: salama iskee korkean kuusen latvaan, etenee sen juuresta talon maadoitusjohtoon ja rikkoo sähkölaitteita, nousee johtoa pitkin sähköpylvääseen, siirtyy sen harusvaijeria pitkin maahan, johon kyntää ojan kohti läheistä järveä ja vääntää vielä tielle osuneen ruohonleikkurin solmuun. Esisalama on siis pyrkinyt järveen, mutta vastasalama on ehtinyt syntyä kuusen latvaan, koska kuorenalainen kostea nilakerros johtaa sähköä. Salaman tuhovoima perustuu sekä voimakkaan sähkövirran synnyttämään kuumuuteen, joka rikkoo sähkölaitteita ja sytyttää tulipaloja tai kiehuttaa vettä, että voimakkaaseen magneettikenttään, joka kohdistaa esimerkiksi johtimien mutkiin suuria voimia.

6.2 Rakennusten suojaaminen

Rakennusten ukkossuojaus perustuu siihen, että iskun kohteeksi joutumista ei voi estää, mutta sähkövirta johdetaan *ukkosjohdon* (ukkosenjohdattimen) avulla turvallisesti maahan niin laajalle alalle, että se neutraloi salaman varauksen. Rakennuksen korkeimpaan kohtaan, esim. savupiippuun, kiinnitetään salaman "sieppaajaksi" metallipiikki, jollaisena voi toimia myös televisioantennin metallirunko. Siitä viedään johtimet vastakkaisista räystäistä ja nurkkia pitkin maahan. Talon ympärille kaivetaan rengasmaisen johdin, joka toimii maadoituksena ja estää myös

talon lähelle maahan tai puuhun iskevän salaman virtaa johtumasta talon alle. Rengasjohtimen maadoitusta voidaan tehostaa pystysuorilla maahan iskettävillä metallitangoilla. Rengasjohdin yhdistetään myös talon sähkömaadoitukseen. Rakennuksen suojausta suoralta iskulta havainnollistaa kuva 6.1. Jos talossa on peltikatto, se pitäisi maadoittaa samaan tapaan kuin ukkosjohto, vaikka erillistä salamansieppaajaa ei asennettaisikaan. — Ukkosjohdon käyttöönottoa Suomessa 1700-1800-lukujen vaihteessa on tutkinut Matinoli (1980).



Kuva 6.1. Pientalon suojaaminen suoralta salamaniskulta. s: salamansieppaaja, k: kattojohtimet, a: alastulojohtimet (vastakkaisissa nurkissa), r: rengasjohdin (maan alla), m: sähköverkon maadoituspiste.

Suoran salamaniskun lisäksi, vieläpä tätä useammin, rakennuksia uhkaa epäsuora salamanisku eli ylijännite, joka saapuu sähkö- tai puhelinjohtoa pitkin (kohta 6.3) ja voi sytyttää tulipalon. Rakennuksen sähköjärjestelmään ja puhelinlinjaan voidaan liittää ylijännitesuojia, jotka ainakin jossain määrin vähentävät epäsuoran salamaniskun vaaraa.

Tarkempia ohjeita rakennusten ukkossuojauksesta on julkaistu suomeksi (SESKO, 1983). Kirjasessa on myös yleistietoa ukkosesta ja sen vahingoista.

6.3 Tele- ja sähköverkkojen suojaaminen

Salaman johtimiin indusoimat virrat ja jännitteet aiheuttavat vahinkoriskejä sekä itse verkolle ja siihen liittyvälle laitteistolle että verkkoon kytketyille laitteille. Joh-

toon tai sen lähelle iskevä salama voi aiheuttaa korkeankin ylijännitteen, joka saat-
taa edetä kauas ja laajalle iskukohdasta. Riski on suurin seuduilla, joilla johdot
ovat ilmajohtoja eivätkä maakaapeleita. Ylijännitteiden lisäksi myös sähkökatkot,
lyhyetkin, ovat kiusallisia esim. tietokoneille. Hyvän perussuojan antavat katkotto-
mat virtalähteet, joissa akku pitää virtaa yllä sähkökatkon ajan ja jotka muutenkin
tasaavat ylijännitteitä. Itse verkkojen suojaaminen on pitkälle tekninen kysymys,
joka menee tämän kirjan alueen ulkopuolelle. Niille, jotka tällaista suojausta joutu-
vat järjestämään, on asianomaista kirjallisuutta saatavilla. Yleiskatsauksen verkko-
jen suojaamisesta antavat mm. Rusck sekä Boyce (ks. Golde, 1977, Vol. II). Katso
myös Elovaara & Karttunen (1978) sekä Tuomi & Välimaa (1990).

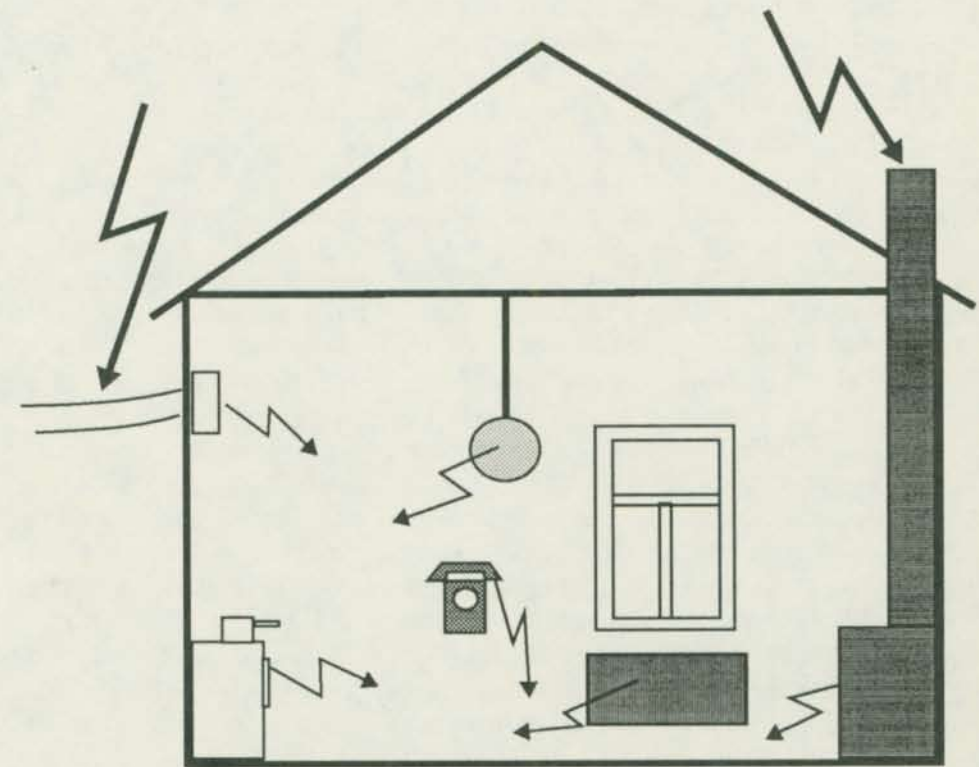
Boyce toteaa puhelinlinjojen osalta, että esisalaman tullessa alle 25 metrin pää-
hän pylvästä tai ilmajohtosta se iskee siihen. Erillisten johtojen välillä tapahtuu
silloin ylilyöntejä. 25 ja 3000 metrin välille sattuvat iskut aiheuttavat johtimiin yli
1 kV:n jännitteitä. Jännitepulssi etenee johtimessa kumpaankin suuntaan ja hei-
jastuu takaisin linjan päistä. Indusoitunut virta voi olla jopa satoja ampeereja.

6.4 Henkilökohtainen suojautuminen

Salama surmaa vuosittain Suomessa enintään muutamia ihmisiä (aikaisemmin n.
10 vuodessa, ks. Oksanen, 1940) ja USA:ssa satakunta (Clary, 1985), joten tyypil-
linen uhrien luku on yksi 2-3 miljoonasta. Loukkaantumisia on suunnilleen
kaksinkertainen määrä. Kansainvälinen salamatutkijoiden yhteisö on viime vuosi-
kymmeninä laatinut yksityiskohtaiset ohjeet, joiden mukaisesti ihmisten tulisi suo-
jautua salamalta. Tähän on niistä poimittu tärkeimmät Suomen oloihin soveltuvat.
Suojaustoimenpiteet ovat yleensä helppoja toteuttaa. Myös lehtiutisissa kuvatuista
vahingoista (ks. liite G) voi ottaa oppia — tämä kirja toivottavasti auttaa
soveltamaan niistä saatavaa tietoa.

Jos salama varotoimenpiteistä huolimatta iskee ihmiseen, vammat voivat olla
kolmenlaisia: palovammat, hengityspysähdys ja sydänpysähdys (tai kammio-
värinä). Kaksi jälkimmäistä ovat samanlaisia kuin sähköiskussa yleensäkin ja elvy-
tystoimet ovat sen mukaisia. Hengityspysähdys, joka johtuu aivojen hengitys-
keskuksen läpi kulkeneesta sähkövirrasta, yritetään hoitaa puhalluselvytyksellä eli
suusta suuhun -menetelmällä, ja sitä voi yrittää kuka tahansa. Tarkat ohjeet olisi
kuitenkin syytä etsiä jostakin ensiapuoppaasta. Sydämen tilan toteaminen ja sen
asianmukainen elvyttäminen (painantaelvytys) vaativat ensiapukoulutusta: jos
sydän onkin toiminnassa, painantaelvytys on sille vaarallista. Jos vaatteet eivät
syty palamaan, salaman aiheuttamat palovammat ovat yleensä lieviä, ja niihin on
syytä kiinnittää huomiota vasta, kun hengityksen ja verenkierron on todettu
toimivan.

Rakennuksen sisällä suoran salamaniskun vaara on yleensä vähäinen. Siellä tu-
leekin ennen kaikkea varoa epäsuoraa iskua eli sähkö- tai puhelinlinjasta tulevaa
ylijännitettä (kuva 6.2). On siis syytä olla käyttämättä sähkölaitteita ja pysytellä
pois niiden lähetyviltä — myös vesilämpöpattereita hyvinä maadoituskohteina
tulisi karttaa. Jos puhelin soi ukkosella, kannattaa odottaa, että se pirahtaa toistu-
vasti, jolloin kysymys ei ole ylijännitteen aiheuttamasta väärästä ja samalla vaaral-
lisesta hälytyksestä. Televisioantennin johto kannattaa irrottaa television takaa jo
laitteenkin suojelemiseksi. Vaikka television ulkoantennin runko on yleensä maa-
doitettu (ainakin sen täytyisi olla), voi ylijännitettä syntyä antennijohtoonkin.



Kuva 6.2. Epäsuoralle salamaniskulle (ylijännitteille) altteimmat paikat rakennuksen sisällä. Myös suora isku savupiippuun on vaarallinen. Turvallisin paikka on huoneen kes-
kellä kaukana osoitetuista paikoista.

Jos salama iskee suoraan taloon, yksi otollisimpia kohteita on savupiippu, jonka
noki johtaa sähköä. Tulisijojen läheisyyttä on siksi myös vältettävä, siinäkin ta-
pauksessa, että rakennuksessa on ukkosjohto. Ikkunat ja ulko-ovet täytyy sulkea, ei

vain sateen takia, vaan myös estämään salamakanavan muodostumista aukkoon. Myös pallosalaman (liite D) väitetään ilmaantuvan huoneeseen helposti avoimesta ovesta tai ikkunasta, joskus tosin jopa suljetun ikkunan läpi.

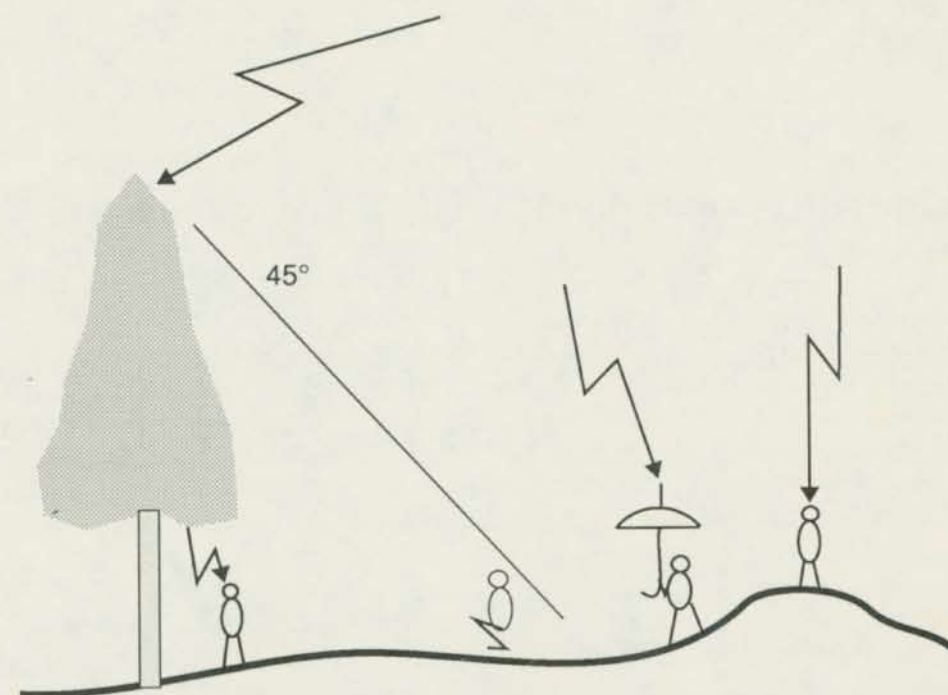
Suora salamankuula on merkittävä vaaratekijä ulkona (kuva 6.3), sillä ihminen on suurimmaksi osaksi vettä ja johtaa siksi hyvin sähköä. Salaman riskiä on erittäin vaikea arvioida. Vaikka äänen ja leimahduksen aikaerosta (kohta 4.6) voitaisiin todeta lähimmän salaman iskeneen vielä kauas, voi seuraava salama iskeä lähelle, jos pilvi alkaa olla yläpuolella; kohdassa 5.4 todettiin, että kovissakin ukonilmoissa peräkkäisten salamoiden etäisyys voi olla 20 km. Samoin on muistettava, että vaikka monet maasalamat iskevät suoraan alas, salama voi toisinaan edetä useita kilometrejä sivusuuntaan.

Aukealla alueella seisova ihminen on mitä otollisin iskukohde. Ellei ole mahdollisuutta päästä turvaan, on paras suojautumiskeino asettua maahan kyykkyyntä tai polvilleen jalat yhdessä. Näin on tehtävä viipymättä, jos tukan nouseminen pysyy tai kärkipurkaus esim. metalliesineistä tai puunlatvoista (liite C.1) ilmaisee sähkökentän olevan poikkeuksellisen voimakkaan. Jos salama iskee maahan lähelle, maassa etenevä salaman sähkövirta aiheuttaa harallaan olevien jalkojen välille vaarallisen korkean *askeljännitteen*. Koska salamavirta etsii hyvin johtavia reittejä, on sellaisia, kuten vettä kerääviä ojanpohjia, vältettävä. Golfkenttä on tyypillinen paikka, jossa aukea tila aiheuttaa vaaraa. Ihmisryhmien on hajaannuttava niin, että välimatkat ovat ainakin muutamia metrejä.

Kun lähistöllä on puita, niiden merkitys salamariskin kannalta on kaksiteräinen miekka. Puu turvaa parhaiten iskulta, jos asetutaan puusta suunnilleen sen korkeutta vastaavalle etäisyydelle välttämällä kuitenkin pitkien alaoksien läheisyyttä. Tällöinkin paras asento on yllä mainittu kyykkyasento. Toisaalta ukkoskuuron aikana tulee erittäin suuri houkutus mennä sateensuojaan puun alle, varsinkin suuren kuusen, mutta vaara on silloin todella lähellä: puuhun iskevä salama pyrkii hyppäämään alaoksasta sen alla olevaan ihmiseen (*sivuisku*), jonka kautta sähkö johtuu maahan paremmin kuin puun runkoa pitkin.

Sähköä hyvin johtavina erilaiset metalliesineet lisäävät salamankuulan mahdollisuutta. **Sateenvarjo toimii salamansieppaajana, josta puuttuu tärkein osa, maadoitus, ja on siksi erittäin vaarallinen** (ohje: parempi kastua kuin katua!). Samanlaisen riskin aiheuttaa polku- tai moottoripyörä ja jopa lastenvaunut. Tällaisista esineistä pitäisi pysytellä loitolla salamavaaran aikana.

Metalli toisaalta antaa suojan salamalta, kun se ympäröi joka puolelta, riippumatta maadoituksesta. Se toimii ns. *Faradayn häkkinä*, jossa sähkövirta kulkee ulkopinnalla eikä vaikuta sen sisällä. Useimmin käsillä oleva Faradayn häkki on auto, joka onkin käytännössä erittäin suositeltava turvapaikka. Autossakaan ei ole syytä koskea korin metalliosiin eikä radioon, josta on suora yhteys ulkoantenniin. Todettakoon, että auton kumirenkailla sen paremmin kuin kävelijän saappaillakaan ei ole eristeenä suurta merkitystä suojauksen kannalta. Jos salama iskee autoon,



Kuva 6.3. Suoran salamankuulan vaara ulkona. Suuri iskuvirta on osoitettu salamaa kuvaavalla nuolella. Suositeltavinta on asettua kyykkyyntä korkean puun tms. lähistölle sen korkeutta vastaavalle etäisyydelle tai hieman kauemmaksi.

virta purkautuu renkaan pintaa pitkin maahan. Itse metallikorissa virta kulkee näkymättömänä. (Iskun jälkeen auton renkaiden ja mahdollisesti muidenkin osien kunto on tarkistettava.) Häkkisuoja antavat myös metalliset veneet, laivat ja lentokoneet. Lentokoneet tosin pyrkivät kiertämään ukkospilviä, joten vaara on muutenkin vähäinen. Lastenvaunut eivät anna vauvalle riittävää suojaa.

Pienveneet ja uimarit ovat ukkosella samassa tilanteessa kuin aukealla maalla olijat, ja ainoa neuvo on pyrkiä ennakoimaan ukkoskuuron tulo ja hankkiutumaan ajoissa rantaan, ei vähiten ukkospuuskien takia. Purjeveneessä tilanne on samantapainen kuin puun alla. Masto tai ainakin harukset ovat yleensä metallia ja johtavat sähkövirran maston huipusta alas. On erittäin tärkeää, että maston ja harusten alapää "maadoitetaan" veteen esim. metallisen kölin kautta tai irtonaisella metallivaijerilla. Veneessä on syytä asettua paikkaan, jossa ei ole aivan maston tai harusten vieressä. Maadoitus takaa silloin melko hyvän turvan.

Liite A Ilmakehän rakenteesta ja dynamiikasta

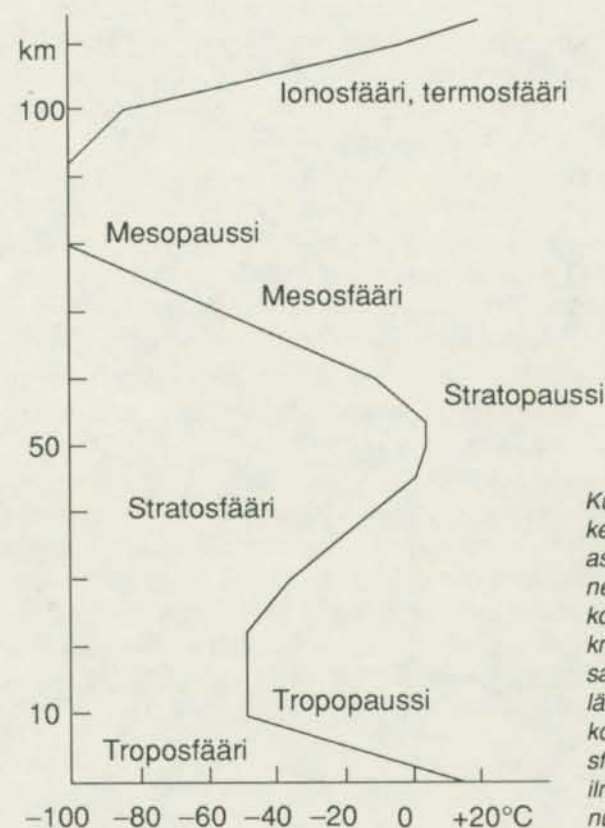
Ukkosten esiintymisen ja käyttäytymisen ymmärtämiselle on välttämätöntä tuntea ilmakehän rakennetta pystysuunnassa sekä erilaisten ilmassojen välistä vuorovaikutusta. Meteorologian perusteista on olemassa jonkin verran suomenkielistä kirjallisuutta (esim. Angervo, 1948; Holopainen & Huovila, 1972; Peltonen & Puhakka, 1984; Harjama, 1986). Tässä tarkastellaan eräitä ilmakehän piirteitä, joilla on merkitystä ukkosen ja yleensä ilmasähkön kannalta.

A.1 Ilmakehän kerrokset

Ilmakehän pääkoostumus (tyyppiä 78 tilavuusprosenttia, happea 21 %) pysyy samanlaisena aina 100 km korkeuteen saakka, mutta monet muut ominaisuudet ovat tällä matkalla voimakkaasti kerrostuneita. Käyttökelpoisin kerrostuneisuutta kuvaava suure on lämpötila, jonka perusteella ala- ja keski-ilmakehä jaetaan kolmeen *termiseen kerrokseen* (kuva A.1). Alimman 10-15 km sisällä, troposfäärissä, lämpötila laskee jyrkästi, n. $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ja on alimmillaan -50°C (tropiikissa -70°C) vaiheilla kerroksen ylärajalla, tropopaussissa, ja tämän yläpuolella 20 km:iin asti. Stratosfääriä luonnehtii lämpötilan nousu korkeuden mukana aina 0°C paikkeille, joka saavutetaan 50 km korkeudella, stratopaussissa. Lämmityksen aiheuttaa otsoni (kolmiatominen happi O_3), joka absorboi Auringon ultraviolettisäteilyä. Tämän jälkeen lämpötila taas laskee mesosfäärissä ja saavuttaa mesopaussissa 80 km korkeudella alimman arvonsa, noin -100°C . Tästä ylöspäin ilmakehän kaasu sisältää merkittäviä määriä varattuja hiukkasia, ioneja, mm. vapaita elektroneja, jotka harvassa ilmassa pystyvät liikkumaan nopeasti ja tekemään yläilmakehän, ionosfääriin, hyvin sähköä johtavaksi (vrt. liite B.4).

Ilmakehän energian lähteenä toimii Auringon säteily, josta suuri osa on näkyvää valoa. Se lämmittää ennen kaikkea maanpinnan lähellä olevaa ilmaa, joka etenkin tropiikissa (päiväntasaajan lähellä) harvenee lämmitessään niin paljon, että ilma nousee ylös. Tällaista pystyvirtausta sanotaan konvektioksi. Troposfäärin lämpö-

tila ei laske aina niin säännöllisesti kuin kuvassa A.1 on esitetty. Öiseen aikaan tai kylmänä vuodenaikana päivälläkin voivat maanpinta ja sen lähellä oleva ilma jäähtyä säteilemällä (*ulosäteily*) niin paljon, että syntyy käänteinen lämpötilan jakautuma eli *inversio*: alempana on kylmempää, ylempänä lämpimämpää. Silloin konvektiovirtaukset estyvät kokonaan. Päiväsaikaan, varsinkin kesällä, Auringon lämmitys hävittää maanpintainversion ja konvektio sekoittaa maanpintailmaa ja ylempänä olevia ilmakerroksia.



Kuva A.1. Ilmakehän termiset kerrokset kesällä Suomen leveysasteilla. Jokaista kerrosta luonnehtii lämpötilan nousu tai lasku korkeuden mukana. Ylintä, yli 80 km:ssä olevaa kerrosta voidaan sanoa sekä termosfääriksi (koska lämpötila kasvaa korkeimmaksi koko ilmakehässä) että ionosfääriksi (koska merkittävä osa ilman molekyyleistä on ionisoitunut).

Sekoittuminen näkyy selvästi siinä, miten maanpinnan lähellä olevassa ilmassa leijuva pöly (aerosoli) leviää ylöspäin. Sekoittuminen on tehokasta tietyille *sekoittumiskorkeudelle* asti, jonka alapuolella ilma on usein autereista, sameata, ja yläpuolella kirkasta. Päiväsaikaan sekoittumiskorkeus on Suomessa kesällä 1-2 km ja talvella puolisen kilometriä. Joissakin inversiotapauksissa esim. öisin se voi olla

sadan metrin luokkaa.

Eräissä ilmassaukkosissa, jolloin Suomessa on hyvin helteistä, kosteaa ja autereista ilmaa (esim. kaakosta saapunutta), sekoittuminen on voimakasta ja sekotuskorkeus suuri. Sameuden takia on ukkospilvien alareunoja vaikea erottaa, ja niiden yläosat näyttävätkin nousevan suoraan autereesta, aluksi kumpupilvimäisinä ja myöhemmin jääsumuhunnuiksi muuttuen.

Koko troposfäärin mitassa tapahtuvaa konvektiota, esimerkiksi ukkospilvien kasvua, rajoittaa tropopausista alkava inversio, joka jatkuu stratosfäärin yläosaan saakka. Siksi sään kannalta tärkeimmät virtaukset rajoittuvat troposfääriin.

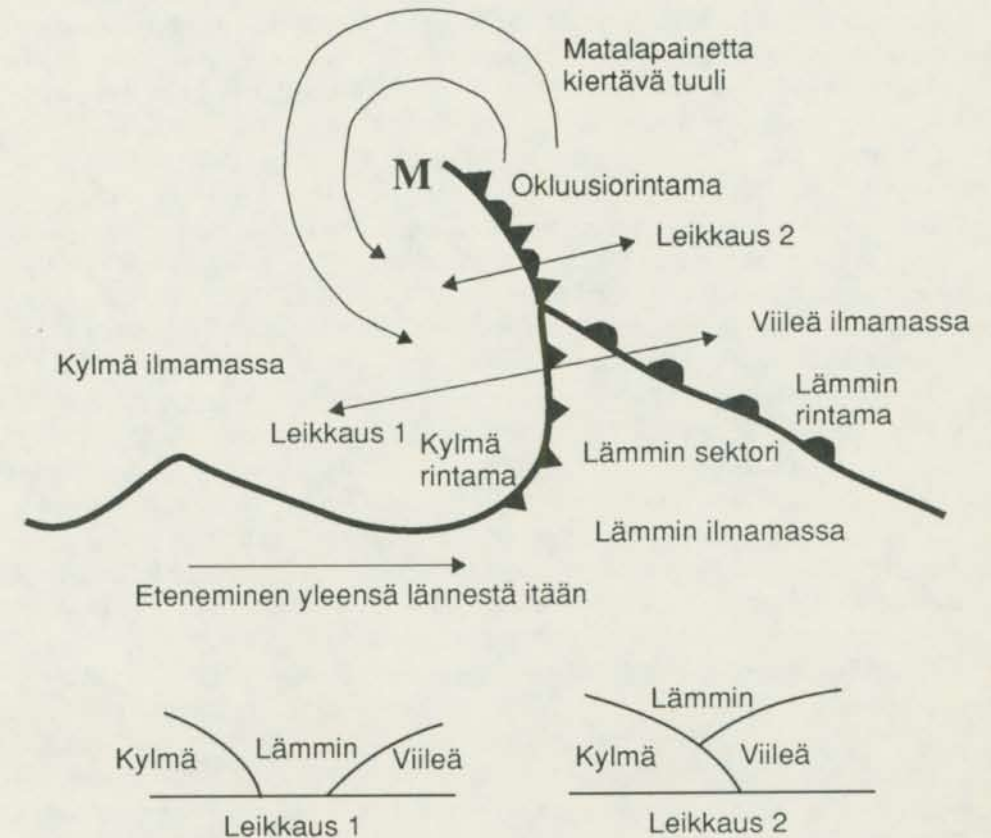
Kun ilma kohoaa ylöspäin, se laajenee ja jäähtyy yhden celsiusasteen aina 100 metrin nousua kohti. Ilman kosteus alkaa muodostaa pisaroita tiivistymiskorkeudella sellaisessa lämpötilassa, jossa vesihöyry tulee kyllästyneeksi eli sen (osa)paine ylittää tietyn rajan. Ilmanpaine maanpinnan lähellä on noin 100 kPa, josta vesihöyryn paine on vain murto-osa: kyllästymispaine on esim. 0°C:ssa 0,61 kPa ja 20°C:ssa 2,34 kPa. Suhteellinen kosteus on vesihöyryn paineen ja kyllästymispaineen suhde, joten kyllästyneen vesihöyryn suhteellinen kosteus on 100 %. Jos esim. maanpinnalla kosteus on 70 % ja lämpötila 20°C, vesihöyry tulee kylästyneeksi lämpötilassa 14,5°C. Tämä lämpötila saavutettaisiin 6°C/km alenemisnopeudella 920 metrin korkeudella. Tosin paine ylöspäin noustessa pienenee, ja kyllästymispaineen saavuttaminen vaatii vielä alhaisemman lämpötilan.

Nousevassa ilmassa siis suhteellinen kosteus kasvaa, kunnes ylikyllästyminen (yli 100 %:iin) johtaa höyryn tiivistymiseen vedeksi. Ilmakehässä se tapahtuu tiivistymiskeskuksina toimivien pölyhiukkasten pinnalle. Nollalämpötilan alapuolella höyry härmistyy jääksi, jonka suhteen kyllästyneen höyryn paine on alempi kuin veden suhteen. Lämpötilassa 0°C kyllästymiskosteus on sama veden ja jään suhteen, mutta esim. -20°C:ssa merkitsee 100 % suhteellinen kosteus jään suhteen vain 82 % suhteellista kosteutta veden suhteen. Jos siis talvella 20 asteen pakkasessa suhteellinen kosteus veden suhteen ylittää 82 %, vesihöyry härmistyy jääkiteiksi, joita voi ruveta yhtäkkiä satamaan pilvettömältäkin taivaalta. Kyllästymiskosteuksien ero vedellä ja jäällä johtaa ukkospilvessä jää- ja lumikiteiden muodostumiseen ja edelleen pilven sähköistymiseen.

A.2 Ilmavirtaukset ja rintamat

Edellä mainittu ilmakehän lämpötilajakautuma korkeussuunnassa on enemmän tai vähemmän pysyvä piirre, jossa tapahtuvat muutokset ovat melko hitaita ja vähäisiä; termistä kerrostumista voidaan pitää lähinnä rakenteellisenä ilmakehän ominaisuutena. Ilman liike suuressa mittakaavassa taas on luonteeltaan ennen kaikkea dynaaminen ilmiö: maapallon pyörimisliikkeeseen, painovoimaan ja il-

manpaineeseen liittyvien voimien vuorovaikutus johtaa jatkuvaan muutokseen, joka troposfäärissä koetaan säätilan vaihteluna.



Kuva A.2. Säärintamat. Kehitys tapahtuu siten, että kylmä massa liikkuu nopeimmin, jolloin lämmin sektori sulkeutuu kärkeä alkaen ja kylmä ja lämmin rintama sulautuvat okluusiorintamaksi. Alkuperäiseen kärkeen muodostuu matalapaineen keskus, jota tuuli kiertää vastapäivään. Matalapaineen täytyessä okluusiorintamakin häviää.

Suurimmassa mittakaavassa, ilmakehän yleisessä kiertoilikkeessä, tropiikissa nouseva ilma virtaa troposfäärin yläosassa kohti napoja, mutta painuu alas jo 30.-40. leveysasteen tienoilla (hepoasteilla) kummallakin pallonpuoliskolla. Toinen nousevien ilmavirtausten vyöhyke on 60. leveysasteen paikkeilla, joten se on Suomenkin sään kannalta ratkaiseva tekijä. Sen ylläpitäjänä ei ole suoraan auriongonpaiste tälle alueelle, vaan siinä vuorovaikuttaa kaksi erilaista ilmassaa, joiden raja-alueelle, *polaaririntamavyöhykkeelle*, syntyy mm. matalapaineita.

Suurin osa ilmakehän massasta on troposfäärissä, sääilmiöiden pääasiallisella

näyttämöllä. Suomen kannalta kiintoisinta on rintamiin liittyvä toiminta. Pohjoisen pallonpuoliskon hepoasteilla, esim. Saharan seudulla, alas tulevasta ilmasta osa kääntyy maanpinnan tuntumassa takaisin päiväntasaajalle ja osa kohti pohjoista. Maan pyörimisliike (sen aiheuttama ns. *Coriolis-voima*) saa pohjoisella pallonpuoliskolla virtauksen kääntymään oikealle, joten alas painuvasta ilmasta ensin mainittu osa kääntyy kohti länttä pasaatituuleksi ja jälkimmäinen kohti itää, jolloin muodostuu länsituulten vyöhyke, jonka vaikutuspiiriin Suomikin kuuluu. Pohjoisnavan lähellä taas ilma virtaa sinne troposfäärin yläosassa ja palaa etelään pitkin maanpintaa, ja Coriolis-voima kääntää tämän oikealle kohti länttä, itätuuleksi.

Pohjoisesta tuleva *arktinen* tai mantereinen *polaarinen ilmamassa* on usein kylmää ja kuivaa ja muuttuu lämpimän maan yläpuolella epävakaaaksi, jolloin pohjoisen puoleiset tuulet ovat kovia ja puuskaisia. Vähäinen kosteus ei riitä runsaaseen pilvien muodostumiseen saati ukkosiin. Merellinen polaarimassa sen sijaan on kosteata ja voi aiheuttaa ilmassaukkosia.

Trooppinen ilmamassa on useimmiten vallitseviin lännen puoleisiin tuuliin liittyvää merellistä, kosteaa ja lämpimämpää kuin polaarimassa. Tosin Suomessa esiintyy usein myös mantereisempi trooppinen ilmamassa, kun massojen raja on tavallista pohjoisemmassa; tällöin länsituulen sijasta voi vallita etelä- tai itätuuli.

Troposfäärin yläosassa ilma virtaa yleensä hieman eri suuntaan kuin maanpinnan lähellä. Näin voi kostean ilmassan yläpuolelle virrata kylmää ilmaa (*kylmä advektio*), joka tekee ilman epävakaaaksi ja aiheuttaa konvektiota. Tällainen on tyypillinen ilmassaukkosten synty tapa Suomen leveysasteilla.

Keskileveysasteiden polaaririntamavyöhykkeessä kohtaavat idästä tai koillisesta virtaavat kylmät arktiset ja polaariset ilmassat sekä lounaasta tai lännestä tulevat lämpimät trooppiset massat. Rajapinta on epävakaa, ja massat kiertyvät toistensa ympäri vastapäivään. Kiertokeskuksessa rajapinta taivuttaa kärjeksi, johon syntyy *syklonin* eli matalapaineen keskus (kuva A.2). Kuten poikkileikkauksista näkyy, matalapaineen muodostuessa lämmin ilma jää kahden raskaamman polaarimassan väliin ja nousee.

Lämpimän ilmassan kieleke jää kahden *rintaman* väliin muodostaen *lämpimän sektorin*, jonka ilma on usein altista auringonpaisteen laukaisemalle lämpöukkoselle. Sykloni matalankeskuksineen ja rintamineen liikkuu niin, että kylmä ilmamassa jää vasemmalle ja lämmin oikealle (suunta on siis yleensä kohti itää). *Lämmin rintama* kulkee lämpimän sektorin edellä ja *kylmä rintama* sen jäljessä. Syklonin kehittyessä kylmä rintama saavuttaa lämmintä ja ne sulautuvat yhteen keskuksesta lähtien muodostaen *okluusiorintaman*, joka sitten häviää vähitellen matalapaineen täytyessä.

Rintamapinta on erittäin loiva — kaltevuudeltaan tyypillisesti 1:50...1:100 — joten troposfäärin 10 km:n korkeutta vastaten rintamavyöhykkeen syvyys etene-missuunnassa on satojen kilometrien luokkaa. Kylmä rintama on jyrkempi kuin lämmin, ja rintamaukkosissa on useimmiten kysymys kylmästä rintamasta.

Liite B Ilmasähkövirtapiiri

Vaikka arkielämän kannalta maanpinnan lähellä olevaa ilmaa voidaan pitää hyvänä sähköön eristeenä, se tosiasiaa johtaa sähköä. Sähkövirran kuljettajina toimivat kaasuionit (pionit), molekyylikokoa olevat varatut hiukkaset, joita kosminen ja radioaktiivinen säteily synnyttävät ilman molekyyleistä. Ala- ja keski-ilmakehän ohella ionosfääri ja maanpinta muodostavat globaalisen, maapallonlaajuisen *ilmasähkövirtapiirin*, jossa virran pääasiallinen ylläpitäjä eli generaattori on ukkos-toiminta koko maapallolla. Ennen kuin tarkastellaan itse virtapiiriä, luodaan lyhyt katsaus ilmasähkön historiaan (Israel, 1970; Prinz, Dibner, ks. Golde, 1977, luvut 1-2; Pirjola & Tuomi, 1980).

B.1 Ilmasähkötutkimuksen historiaa

Salaman yhteyttä sähköilmiöihin alettiin uumoilla 1700-luvun alussa, kun huomattiin sen muistuttavan sähkökipinää, jollainen saatiin aikaan esim. hankaamalla meripihkaa. Tunnetuin pioneeri ilmasähkötutkimuksen alalla oli amerikkalainen Benjamin Franklin, joka vuonna 1750 ehdotti, että tutkija voisi yrittää sähköistää itsensä ukkospilven alapuolella pystysuoralla metallimastolla; jos hän saisi aikaan kipinöitä, ukkosen sähköisyys olisi todistettu. Näin onnistuttiinkin tekemään, samoin vastaavissa leijakokeissa, joista Franklin teki ensimmäisen 1752. Ensimmäiset tutkijat eivät tajunneet kokeidensa sananmukaisesti hiuksia nostattavaa vaarallisuutta, vaan päinvastoin sellaisia käytettiin jopa hauskoina sirkustemppuina. Kuitenkin jo vuonna 1752 pietarilainen professori menehtyi tällaisessa kokeessa salaman aiheuttamaan sähköiskuun.

Yllä mainituissa mastokokeissa ranskalainen L.-G. LeMonnier havaitsi, että sähköisyyttä esiintyi myös kauniilla ilmalla, mutta paljon heikompana. Italialainen G.B. Beccaria totesi myöhemmin, että mastoon kertyvä sähkö on erimerkkistä eri olosuhteissa: kauniin ilman sähkö on "lasisähköä" (positiivista) ja ukkossähkö "hartsisähköä" (negatiivista).

Vuonna 1779 H.B. de Saussure tulkitsi aivan oikein, että kauniin ilman positiivinen sähkö on ilmassa leijuvaa (avaruus)varausta ja havaitsi, että siihen liittyvällä sähkökentällä on säännölliset vuorokausi- ja vuodenaikavaihtelut. Suomessa ilmasähkömittauksia, niin ikään sähkökenttää koskevia, teki ensimmäisenä Helsingissä fysiikan professori Selim Lemström 1890-1911 ja sai esille vastaavat vaihtelut. Yhteenvedon viime vuosina Suomessa tehdyistä mittauksista on julkaissut Tuomi (1989).

Ilman sähköjohtavuuden havaitsi ensimmäisenä ranskalainen C.A. Coulomb (jonka kunniaksi sähkövarauksen yksikkö on coulombi) vuonna 1785, kun varattu eristetty kappale menetti varaustaan ilmassa. Tulos jäi kuitenkin unohduksiin, kunnes W. Linss 1887 keksi johtavuuden uudestaan. Selitys sille löytyi vuosisadan vaihteessa, kun J.J. Thomson totesi 1898 radioaktiivisen säteilyn synnyttävän ioneja ja J. Elster ja H. Geitel 1899 selittivät ilman ionisoitumisen tämän perusteella. Ionien olemassaolo ei vielä selittänyt sähkökenttää, joka saa ne liikkeelle sähkövirtana; C. Wilson esitti vuonna 1920, että virtapiirin ja sitä kautta kauniin ilman sähköisyyden generaattorina toimivat ukkospilvet.

B.2 Kauniin ilman sähköisyys

Ilmakehän kaasuja ionisoivat kosminen säteily ja alailmakehässä myös radioaktiivisuus, jota esiintyy paitsi ilmassa myös maaperässä. Ionisaation voimakkuus eli *ionituotto* ilmaistaan muodostuvina ionipareina tilavuus- ja aikayksikköä kohti ($\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$) tai esim. mikroröntgeneinä tunnissa ($\mu\text{R/h}$). Tyypillinen tuotto Etelä-Suomessa on $6,6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$ ($12,0 \mu\text{R/h}$), josta $3,6 \mu\text{R/h}$ johtuu kosmisesta säteilystä, $6,6 \mu\text{R/h}$ maaperän gammasäteilystä (yht. 10,2) ja $1,8 \mu\text{R/h}$ ilmassa olevista radonkaasun jälkeläisistä. Radonin osuus vaihtelee ilmassan mukaan. Maan gammasäteilyä aiheuttavat kalium-isotooppi (K-40) ja uraani- ja toriumsarjojen isotoopit. Tshernobylin onnettomuuden jäljiltä maassa on paikoitellen myös cesiumia (Cs-137).

Alailmakehän ionisaatiossa typpimolekyyli N_2 tai happimolekyyli O_2 menettää elektronin muuttuen positiiviseksi ioniksi (N_2^+ , O_2^+). Elektroni tarttuu helpoimmin neutraaliin happimolekyyliin muodostaen negatiivisen ionin O_2^- . Erilaisten reaktioiden kautta positiivinen tyyppi ja happi kaappaavat puuttuvan elektronin vesimolekyyliä ja palautuvat neutraaleiksi. Positiiviseksi jäänyt vesi reagoi neutraalien vesimolekyylien (H_2O) kanssa niin, että tuloksena on positiivinen oksonium-ioni H_3O^+ neutraalien happi- ja vesimolekyylien ohella. Oksoniumiin ja negatiiviseen happeen tarttuu vielä muutama vesimolekyyli.

Näin syntyvät kaasumolekyylien kokoluokkaa olevat *pienionit* eivät säily kovin kauan, vaan ioni törmää vastakkaismerkkiseen pienioniin muodostaen neutraaleja

kaasumolekyyliä, tai tarttuu aerosolihiukkaseen (pölyhiukkaseen) ja varaa tai neutraloi sitä. Pienionit ovat kooltaan nanometrin suuruusluokkaa ja aerosolihiukkaset tyypillisesti 0,1-1 mikrometrin luokkaa eli 100-1000 kertaa suurempia. Ionin liikkuvuus eli kyky kerätä nopeutta sähkökentässä on sitä parempi mitä pienempi se on; sähköjohtavuus ilmassa on käytännössä pienionien ansiota. Johtavuus on kummankin pienionilajin johtavuuksien summa

$$\sigma = \sigma^+ + \sigma^- = k e (n^+ + n^-) = 2 k e n \quad (\text{B.1})$$

missä on otettu huomioon havainto, että pienionien tiheydet ovat yleensä likimain yhtä suuret ($n^+ = n^- = n$); e on elektronin varauksen itseisarvo (liite H) ja k pienionin sähköinen liikkuvuus ($1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$). Tyypillinen johtavuus Etelä-Suomessa on $2 \cdot 10^{-14} \text{ S/m}$ (20 fS/m) (Tuomi, 1989); vertailun vuoksi todettakoon, että maaperän johtavuus on suuruusluokkaa 1 mS/m . Suuri aerosolitiheys vähentää johtavuutta jyrkästi, mikä näkyy ionitasapainoa kuvaavasta yhtälöstä

$$q = \alpha n^+ n^- + \beta n^+ N = \alpha n^2 + \beta n N \quad (\text{B.2})$$

jossa q on ionituotto ($\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$), n pienionien tiheys (m^{-3} , kummankin ionilajin erikseen), N aerosolihiukkasten tiheys (m^{-3} , varattujen ja neutraalien yhteensä), sekä α pienionien välinen yhdistymiskerroin ja β pienionin ja aerosolihiukkasen välinen tarttumiskerroin, kumpikin maanpinnan lähellä suunnilleen $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Johtavuudesta saadaan kummankin pienionilajin tiheydeksi noin $5,2 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$, joten aerosolihiukkasten tiheys on $7,4 \cdot 10^9 \text{ m}^{-3}$ eli yli kymmenkertainen.

Kauniilla ilmalla kulkee ilmasta maahan sähkövirta, jonka tiheys (J) Etelä-Suomessa on keskimäärin $2,8 \text{ pA/m}^2$ ja keskiarvo maapallolla n. 2 pA/m^2 (katso kohta B.5). Virrantiheyden, johtavuuden ja sähkökentän (E) välillä on tavallisesti ainakin likimäärin voimassa *Ohmin laki*

$$J = \sigma E \quad (\text{B.3})$$

joka edellä mainituilla johtavuuden ja virrantiheyden arvoilla antaa Etelä-Suomessa sähkökentäksi 140 V/m , joka suuntautuu ilmasta maata kohti. 170 cm pitkän ihmisen korkeus vastaa siis yli 200 V:n jännitettä. Miksei hän saa sähköiskua tai edes huomaa kenttää? Selitys on siinä, että hän on ilman huonoon sähköjohtavuuteen verrattuna käytännöllisesti katsoen maadoitettu ja sähköpotentiaalinen (jännitteen) tasa-arvopinnat tekevät mutkan hänen kohdallaan, kuten seuraavassa nähdään.

Perusteellista tietoa etenkin kauniin ilman sähköisyydestä on kirjoissa Israel (1970, 1973). Katso myös Tuomi (1982).

B.3 Maanpinnan muodon vaikutus

Ilman sähkönjohtavuutta voidaan maanpinnan lähellä kilometrin luokkaa olevaan korkeuteen asti (sekoittumiskerroksessa, ks. liite A) pitää vakiona, samoin virran tiheyttä ja sähkökenttää tasaisen maan yläpuolella. Tosin aivan maanpinnan tuntumassa negatiivisia ioneja on hieman vähemmän kuin positiivisia, koska negatiiviset ionit kulkevat kauniin ilman kentässä ylöspäin, pois päin maasta, josta niitä ei tule lisää (*elektrodiefekti*, ks. Tuomi, 1982).

Tasaisen maan yläpuolella vakiosähkökenttää E_0 vastaa potentiaali V , joka kasvaa lineaarisesti korkeuden z mukana:

$$V = -E_0 z \quad (\text{B.4})$$

Maassa olevat esineet ja pinnanmuodot asettuvat aina maan potentiaaliin ($= 0$), sillä ilmasähkövirta varaa niitä niin hitaasti, että vuotovirta maahan tasaa heti potentiaalin. Ainoastaan jos eristys takaa pienemmän johtavuuden kuin ilmalla on, voi esine varautua ympäröivän ilman potentiaaliin (tai jos varautuminen on hyvin nopeaa; ukkosjohdossa salaman potentiaalin suuri muutosnopeus asettaa maa-doituksen tehokkuudelle suuret vaatimukset.)

Jos maassa on pystysuora kohoutuma, sen vaikutus tasaisen maan sähkökenttään voidaan laskea sähköstatiikan menetelmillä. Yksinkertainen malli saadaan olettamalla, että maassa on pystyssä kuviteltu viivavaraus; sen ympärille muodostuu tasapotentiaalipintoja, joista yksi voidaan valita kohoutuman pinnaksi asettamalla potentiaali siinä nolaksi (samaksi kuin maan potentiaali). Oletetaan, että kuviteltu viivavaraustiheys λ kasvaa lineaarisesti korkeuden mukana, siis $\lambda = K'z$, välillä $0 \leq z \leq L$ (K' on vakio). K' määritetään jäljempänä niin, että kohoutumasta tulee halutun paksuinen. Erotukseksi kohoutuman voimistamasta sähkökentästä sanotaan alkuperäistä tasaisen maan sähkökenttää E_0 tässä *vallitsevaksi kentäksi*.

z -akselin pisteessä s olevan varausalkion $dq = K'sds$ potentiaali korkeudella z ja vaakasuoralla etäisyydellä r on (ϵ_0 on permittiivisyys, ks. liite H)

$$dV = K's ds / [4\pi\epsilon_0 ((z-s)^2 + r^2)^{1/2}] \quad (\text{B.5})$$

Se, että potentiaali myös maanpinnassa on nolla, huomioidaan maanpinnan alapuolelle kuvitellulla vastakkaismerkkisellä varauksella välillä $-L \leq z \leq 0$ (peilikuvavarauksella). Potentiaali saadaan silloin integroimalla yhtälö (B.5) välillä $-L \leq s \leq L$ ja lisäämällä vallitsevan kentän osuus (yhtälö B.4). Tulos on, kun käytetään merkintöjä $R_1^2 = (z-L)^2 + r^2$, $R_2^2 = (z+L)^2 + r^2$ ja $K = K'/4\pi\epsilon_0$,

$$V = -E_0 z + K[R_1 - R_2 + z \ln((R_1 + L - z)/(R_2 - L - z))] \quad (\text{B.6})$$

Vakio K voidaan sovittaa esim. niin, että kohoutuman tyven säde on r_0 , siis $V = 0$ kun $r = r_0$ ja $z \rightarrow 0$, jolloin

$$K = E_0 / [\ln((\alpha + 1)/(\alpha - 1)) - 2/\alpha] \quad (\text{B.7})$$

kun $\alpha = (1 + (r_0/L)^2)^{1/2}$. Kohoutuman muotokäyrää ei voi ilmaista yksinkertaisella kaavalla, mutta se muistuttaa paraabelia. Tärkein ominaisuus on tekijä, jolla sähkökenttä voimistuu huipussa. Käyttämällä hyväksi sitä, että huipun lähellä $z = L$, saadaan huipun korkeus z_0 likimäärin kaavasta

$$z_0 - L \approx 2L \exp(-(E_0/K + 2)) \quad (\text{B.8})$$

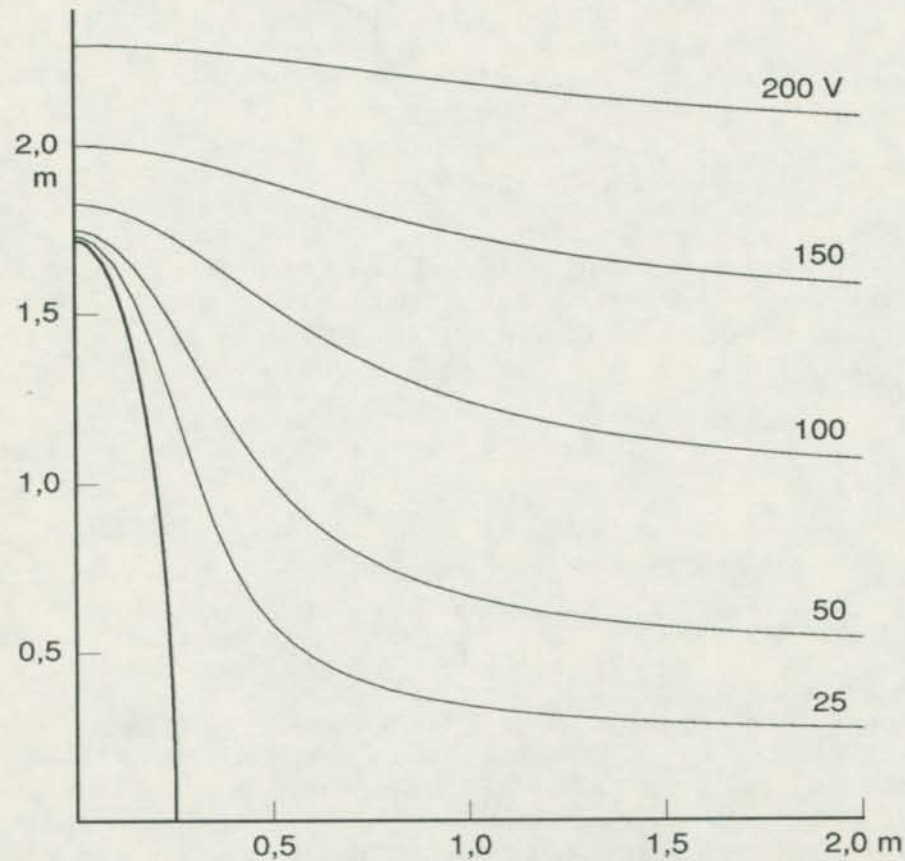
Jos kohoutuma on korkea masto, esim. $L = 10$ m ja $r_0 = 0,1$ m, on $K = 0,1163E_0$ ja $z_0 - L = 0,5$ mm. Pystysuora sähkökenttä huipussa on

$$E \approx KL/(z_0 - L) \quad (\text{B.9})$$

joten mainitulle mastolle E_0 voimistuu 2300-kertaiseksi; 100 V/m kasvaa siis arvoon 230 kV/m. Tarpeeksi voimakkaassa vallitsevassa sähkökentässä voi kärjen lähellä oleva paikallinen kenttä ylittää purkauskynnyksen ja aiheuttaa kärkipurkauksen. Jos kyseessä on puu ($L = 10$ m ja $r_0 = 1,5$ m) tai ihminen ($L = 1,7$ m ja $r_0 = 0,25$ m), sähkökenttä voimistuu vain 20-30-kertaiseksi. Tätä tarkastellaan vielä liitteessä C.1. Ihmistä vastaavaa tapausta esittää kuva B.1.

B.4 Ukkospilven dipolimalli

Ukkospilven yleistä rakennetta ja sen varausjakautumia on jo kuvattu luvussa 3. Pilveen liittyviä sähkökenttiä, jännitteitä ja virtoja on helpointa kuvata yksinkertaisen matemaattisen mallin avulla. Vaikka pilvipisarot kaappaavat pienioneja samaan tapaan kuin aerosolihiukkaset, oletetaan tässä, että pilven sähkönjohtavuus on sama kuin ympäröivän ilman. Samoin jätetään huomiotta sekoittumiskerroksen johtavuutta alentava vaikutus. Ylöspäin mentäessä ilma harvenee ja kosmisen säteilyn vaikutus voimistuu, ja niinpä ilman sähkönjohtavuus kasvaa jyrkästi sekä ionien liikkuvuuden että lukumäärän kasvaessa. Johtavuus kasvaa peräti kymmenkertaiseksi aina 10 kilometrin välein, mitä kuvaa eksponentiaalinen riippuvuus



Kuva B.1. Ilmisen kokoa vastaavan kohoutuman (korkeus 1,7 m, tyven säde 0,25 m) vaikutus ilmasähkökentän tasapotentialipintoihin. Jos sähkökenttä tasaisella maalla on 100 V/m, on se pään kohdalla 2940 V/m.

$$\sigma = \sigma_0 \exp(z/s) \quad (\text{B.10})$$

jossa σ_0 on johtavuus maanpinnan lähellä ($2 \cdot 10^{-14}$ S/m), z on korkeus (km) ja $s = 4,5$ km. Ionosfäärissä, yli 80 km:n korkeudessa, tämä kaava ei enää päde, sillä Maan magneettikenttä tekee johtavuuden epäisotrooppiseksi: virran suunta ei ole enää sama kuin sähkökentän suunta. 80 km:n korkeudella johtavuus on jo $1 \mu\text{S/m}$.

Seuraavalla mallilla kuvataan ukkospilven varauskeskusten vuotovirtaa; varautumisvirta otetaan huomioon vain epäsuorasti siten, että varausten oletetaan pysyvän vakioina vuotovirrasta huolimatta.

Stationaarisessa eli ajallisesti muuttumattomassa tilanteessa on virrantiheys *lähteetön*, mikä matemaattisesti merkitsee, että virrantiheysvektorin $\mathbf{J}$ divergenssi on nolla:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (\text{B.11})$$

Kun Ohmin laki (B.3) ilmaistaan vektorimuodossa

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

ja sähkökenttä lausutaan potentiaalin V gradienttina

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (\text{B.12})$$

niin eksponentiaalisesti pystysuunnassa kasvavan johtavuuden tapauksessa potentiaali toteuttaa differentiaaliyhtälön

$$\nabla^2 V + (1/s)(\partial V / \partial z) = 0 \quad (\text{B.13})$$

jonka tähän tilanteeseen sopiva ratkaisu on (Holzer & Saxon, 1952; Tuomi, 1984)

$$\begin{aligned} V = & (q_1 / 4\pi\epsilon_0) \exp((z_1 - z)/2s) [\exp(-r_{1-}/2s)/r_{1-} - \exp(-r_{1+}/2s)/r_{1+}] \\ & + (q_2 / 4\pi\epsilon_0) \exp((z_2 - z)/2s) [\exp(-r_{2-}/2s)/r_{2-} - \exp(-r_{2+}/2s)/r_{2+}] \\ & + V_\infty (1 - \exp(-z/s)) \end{aligned} \quad (\text{B.14})$$

missä ensimmäinen rivi vastaa korkeudella z_1 ja toinen rivi korkeudella z_2 olevaa pistevarausta (ukkospilven päävarausalueet) sekä kolmas rivi kaikille korkeuksille ja vaakasuorassa suunnassa tasaisesti jakautunutta varausta (kauniin ilman sähköisyys). r_{1-} on havaintopisteen etäisyys varauksesta q_1 :

$$r_{1-} = [u^2 + (z - z_1)^2]^{1/2} \quad (\text{B.15})$$

kun u on vaakasuora etäisyys, ja r_{1+} on vastaava etäisyys maan alle peilikuvapisteesen kuvitellusta vastakkaismerkkisestä varauksesta:

$$r_{1+} = [u^2 + (z + z_1)^2]^{1/2} \quad (\text{B.16})$$

Peilikuvavaraus ottaa matemaattisesti huomioon ilmassa olevan varauksen maanpintaan indusoiman varausjakautuman, jonka ansiosta potentiaali maanpinnassa on nolla; itse ratkaisu ei päde maanpinnan alapuolella. Ratkaisu ei myöskään ole voimassa itse pistevarausten kohdalla, mutta tarkoitus onkin kuvata tilannetta niiden niin väljässä ympäristössä, että varausjakautuman tarkalla muodolla ei ole merkitystä.

Kauniin ilman sähköisyyden osuutta kuvaavassa termissä ei vakiota V_∞ voi suoraan kiinnittää muihin termeihin. Ukkospilven läheisyydessä sen vaikutus onkin pieni ja se voidaan jättää huomiotta. Kohdassa B.5 sitä tarkastellaan erikseen. Esimerkki dipolimallin potentiaalijakautumasta on esitetty kuvassa 4.1.

Ukkospilven varauskeskukset q_1 ja q_2 eivät ole ainoat ilmassa olevat varaukset. Sähkönjohtavuuden muuttuminen korkeuden suhteen merkitsee, että virta kulkee sitä "helpommin" mitä ylemmäksi mennään ja aiheuttaa varauksen kasautumista alas, huonomman johtavuuden alueelle. Tämä ilmenee avaruusvarauksena, jonka tiheys voidaan laskea potentiaalista käyttäen yhtälöitä $\rho = -\epsilon_0 \nabla^2 V$ ja (B.13):

$$\rho = (\epsilon_0 / s) \partial V / \partial z \quad (\text{B.17})$$

(Kysymys on nettovarauksesta; jos johtavuus on vakio eli $s = \infty$, on nettovarauksen nolla, sillä kummankin merkkiset pienionit ovat yhtä tiheässä neutraloiden toistensa vaikutukset, eli niiden varauksiin liittyvät sähkökentät eivät vaikuta molekyylilikokoa suuremmassa mittakaavassa.)

Lokerossa 4.4 (ukkospilven sähkötalous) on tarkasteltu ukkospilven sähkövirtoja lähinnä salamoihin liittyvien voimakkaiden virtojen kannalta. Koska salamoiden aiheuttamat nopeat muutokset eivät sovi tässä esitettyyn stationaarista (vakiona pysyvää) virtajärjestelmää kuvaavaan malliin, oletetaan nyt tarkasteluhetkeksi tilanne, jossa varauskeskukset ovat juuri varautuneet "täyteen" mutta salama ei ole vielä iskenyt — ukkospilvihän onkin likimain tällaisessa tilassa suuren osan ajasta.

Korkeudella z_1 oleva pistevaraus q_1 purkautuu sähköä johtavaan ympäristöönsä virranvoimakkuudella

$$I_o = |q_1| \sigma(z_1) / \epsilon_0 \quad (\text{B.18})$$

Koska varauksen oletetaan pysyvän tarkastelujakson aikana suunnilleen vakiona, virta on sama kuin pilven varautumisvirta. Vastaava kaava pätee toiselle varaukselle q_2 , jonka varautumisvirta on oletettava samaksi, I_o :ksi. Järjestelmän nettovirta

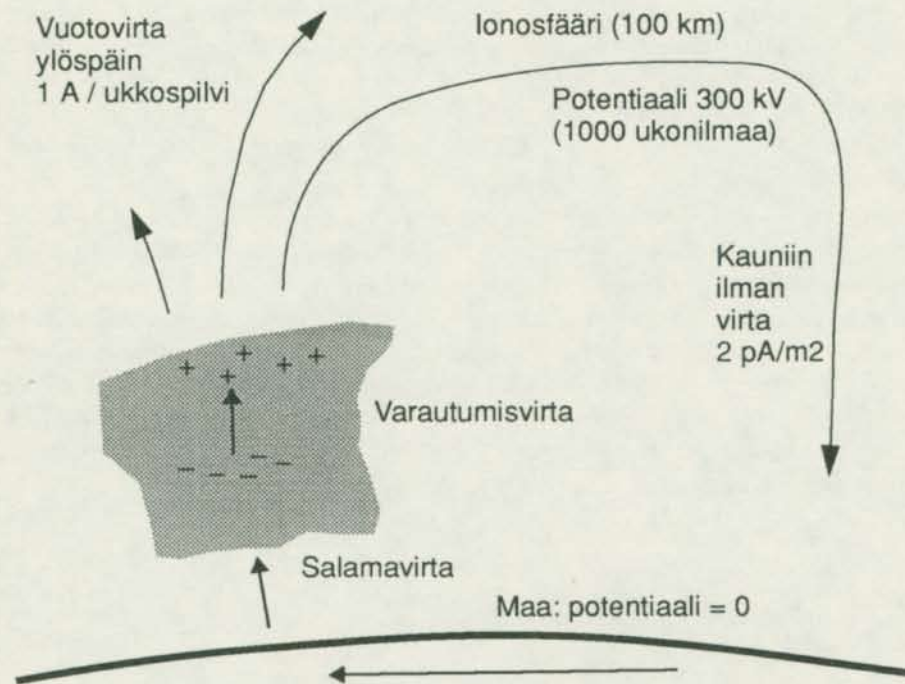
saadaan integroimalla virrantiheyden z -komponentti $J_z = -\sigma (\partial V / \partial z)$ vaakasuoran tason yli (ks. esim. Tuomi, 1984). Osoittautuu, että sekä pilven ala- että yläpuolella on ylöspäin suuntautunut I_o :n suuruinen virta, kun alempi varaus (esim. q_1) oletetaan negatiiviseksi ja ylempi positiiviseksi. Jos $I_o = 1$ A ja johtavuus on yhtälön (B.10) mukainen, saadaan 4 km korkeudella olevaksi q_1 -varaukseksi -182 C ja 8 km korkeudella olevaksi q_2 :ksi $+75$ C. Ylemmän varauksen suuruutta vähentää sen tehokkaampi vuotaminen ylös ionosfääriin.

Nämä varaukset eroavat huomattavasti kohdassa 3.1 ja lokerossa 4.4 annetuista arvoista. Salamoiden huomioonottaminen kääntääkin tilanteen toisinpäin: salamat tyhjentävät varauksia nopeammin kuin vuotovirta ja negatiivista keskusta nopeammin kuin positiivista, ja lokerossa 4.4 esitetty malli on tässä suhteessa realistisempi. Eri piirteet paremmin huomioivia ja yksityiskohtaisempia, mutta numeerista ratkaisemista vaativia ukkospilvimalleja voidaan kehittää. Sellaisten käsittely menisi kuitenkin tämän kirjan tarkoituksen ulkopuolelle. Kohdassa B.6 esitettävä ukkossolun varautumismalli käsittelee vain itse varautumismekanismeja eikä puutu pilven varausten geometriseen jakautumiseen.

B.5 Globaalinen sähkövirta

Jokaisen ukkospilven vuotovirta ionosfääriin jakautuu siellä vallitsevan hyvän johtavuuden ansiosta tasaisesti yli maapallon ennen kuin se kääntyy takaisin kohti maata (kuva B.2). Tyypillinen vuotovirta on yhden ampeerin luokkaa, ja koska maapallolla on jatkuvasti toiminnassa arviolta 1000 ukonilmaa (kohta 5.5), yläilmakehä varautuu koko ajan 1000 A virralla. Virtaa ajaa ylöspäin eksponentiaalisesti korkeuden mukana kasvava johtavuus (yhtälö B.10), ja saman johtavuuden ansiosta yläilmakehän jännite maan suhteen purkautuu kaikkialla maapallolla kauniin ilman virtana. Tätä virtapiiriin osaa kuvaa yhtälön (B.14) viimeinen termi $V_\infty (1 - \exp(-z/s))$. Vakio V_∞ on potentiaali, johon ilmakehän yläosa (tässä siitä käytetään nimitystä ionosfääri, koska kysessä on sähköä hyvin johtava kerros) varautuu maan suhteen; sen tyypillinen arvo on 300 kV.

Ionosfääristä maahan palaava virta kokee resistanssin, jota kuvaa *kolumnaari-vastus* R' eli sellaisen ilmapylvään vastus, jonka poikkipinta-ala on yksikön suuruinen (1 m^2). Se saadaan integroimalla yhtälöä (B.10) vastaava ominaisvastus (resistivisyys) $1/\sigma$ koko ilmakehän paksuuden läpi, jolloin tulos on $R' = s/\sigma_o$. Koko maapalloa edustava σ_o :n arvo lienee $3 \cdot 10^{14} \text{ S/m}$ (vuoristot ja puhtaan ilman alueet kasvattavat sitä), ja jos $s = 4,5 \text{ km}$, on $R' = 1,5 \cdot 10^{17} \Omega \text{ m}^2$. Koska maapallon pinta-ala on $5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$, on kokonaisresistanssi $R = 300 \Omega$. Ohmin lain mukaan tämä sopii yhteen ionosfääriin potentiaalilin 300 kV ja kokonaisvirran 1000 A kanssa. Koko maapallon pinta-alalle jakautuvan virran keskimääräinen tiheys on 2 pA/m^2 .



Kuva B.2. Ukkospilvi globaalisien ilmasähkövirtapiirin generaattorina. Selitys tekstissä.

B.6 Ukkossolun varautumismalli

Sähkökentän ja varauskeskusten kasvua ukkospilvessä voidaan kuvata suhteellisen yksinkertaisella mallilla, jos hiukkasten varautumisnopeuksille voidaan käyttää järkeviä arvoja, riippumatta siitä mitä ovat mikroskooppisen varausten erottumisen mekanismit (Kuettner & al., 1981; ks. myös Volland, 1984). Otetaan tarkastelun kohteeksi pelkästään negatiivinen varauskeskus, jossa lumirakeet varautuvat. Kun lokerossa 4.4 (ukkospilven sähkötalous) käsiteltiin koko ukkospilveä, jonka vaakasuora halkaisija on yli 20 km, tämä teoria koskee yhtä konvektiosolua, jonka halkaisija on 2 km luokkaa ja jonka synnyttämä negatiivisen varauksen kerros muodostaa halkaisijaltaan 4 km suuruisen, 1 km paksuisen pannukakun.

Ison hiukkasen (lumirakeen) varauksen Q muutosnopeus on verrannollinen törmäystaajuuteen v sen ja pienten hiukkasten (jääkiteiden ja pilvipisaroiden) välillä

$$\partial Q / \partial t = v[Q' + \beta E - \gamma Q] \quad (\text{B.19})$$

jossa Q' ($= -10^{-15}$ C) on yhdessä (neutraali)törmäyksessä siirtyvä varaus pienestä isoon hiukkaseen. Kerroin β kuvaa, kuinka tehokkaasti sähkökenttä E aiheuttaa induktiivista varautumista (vrt. kohta 3.3) ja kerroin γ ($\approx 0,005$) ilmaisee, että varauksen häviämisenopeus on verrannollinen itse varaukseen Q . Törmäystaajuus on likimäärin

$$v \approx \pi R^2 w n \quad (\text{B.20})$$

jossa R on ison hiukkasen säde (πR^2 on törmäyspinta-ala; oletetaan $R = 0,5$ mm), w on pienen ja ison hiukkasen nopeusero (10 m/s) ja n on pienten hiukkasten tiheys ($5 \cdot 10^5 \text{ m}^{-3}$). v :n lukuarvo on silloin likimain 4 s^{-1} . Induktiovarautumiskerroin on likimäärin

$$\beta = (4\pi^3/3)\epsilon_0 r^2 \quad (\text{B.21})$$

jossa ϵ_0 on permittiivisyys (liite H) ja r pienen hiukkasen säde (20 μm). β :n arvo on likimain $1,5 \cdot 10^{-19} \text{ Cm/V}$.

Varautumisen makroskooppista osuutta kuvaa virrantiheys J_c , joka koostuu il-mavirrassa ylöspäin kulkeutuvien pienten hiukkasten (tiheys n , nopeus $u > 0$, varaus q) ja alaspäin putoavien isojen hiukkasten (tiheys $N \approx 200 \text{ m}^{-3}$, nopeus $V < 0$, varaus Q) pystysuorista virroista

$$J_c = nuq + NVQ \quad (\text{B.22})$$

jota kompensoi sähkönjohtavuuden lämmöksi kuluttama johtavuusvirta

$$J_d = \sigma E \quad (\text{B.23})$$

Sähkönjohtavuudeksi pilvessä oletetaan $\sigma = 10^{-14} \text{ S/m}$. Sähkövirtoihin liittyvät muutokset varauksissa vastaavat pystysuoran sähkökentän muutosnopeutta

$$\epsilon_0 \partial E / \partial t = -J_c - J_d \quad (\text{B.24})$$

Kun oletetaan isojen ja pienten hiukkasten yhteenlasketut varaukset suunnilleen samoiksi, $nq \approx -NQ$, voidaan Q eliminoida, ja sähkökentälle saadaan differentiaaliyhtälö ($w = u - V$)

$$\partial^2 E / \partial t^2 + (\sigma / \epsilon_0 + v\gamma) \partial E / \partial t + v\gamma(\sigma / \epsilon_0 - \beta Nw / \gamma \epsilon_0) E = vNwQ' / \epsilon_0 \quad (\text{B.25})$$

eli yksinkertaisemmin

$$\partial^2 E / \partial t^2 + a \partial E / \partial t + b E = F \quad (\text{B.26})$$

jossa vakioiden a , b ja F määritelmät ovat ilmeiset. Niiden lukuarvot ovat $a \approx 0,21 \text{ s}^{-1}$, $b \approx -0,00011 \text{ s}^{-2}$ ja $F \approx -0,89 \text{ V/s}^2\text{m}$. Kun määritellään vakiot

$$m_1 = -a/2 + [(a/2)^2 - b]^{1/2} \quad \text{ja} \quad m_2 = -a/2 - [(a/2)^2 - b]^{1/2} \quad (\text{B.27})$$

joiden arvot ovat $m_1 \approx 0,0033 \text{ s}^{-1}$ ja $m_2 \approx -0,025 \text{ s}^{-1}$, sähkökentän E ratkaisu alkuehdolla $Q(0) = 0$, $E(0) = 0$ on

$$E(t) = A_1 \exp(m_1 t) + A_2 \exp(m_2 t) + E' \quad (\text{B.28})$$

missä

$$A_1 = F / (m_1(m_1 - m_2)) \approx -9500 \text{ V/m}$$

$$A_2 = F / (m_2(m_2 - m_1)) \approx -1200 \text{ V/m}$$

$$E' = F / (m_1 m_2) \approx 10\,700 \text{ V/m} \quad (\text{B.29})$$

Positiivisen m_1 :n ansiosta E kasvaa saavuttaen -400 kV/m purkauskynnyksen alle 20 minuutissa. Jos varautumisesta huolehtisi vain induktio ($Q' = 0$, $E' = 0$), joka edellyttäisi nollasta eroavaa alkuarvokenttää (esim. kauniin ilman kenttää, joka on suuruusluokkaa $E(0) \approx -100 \text{ V/m}$), läpilyöntiarvon saavuttaminen kestäisi yli 40 minuuttia, jolloin normaali ukonilma alkaa jo olla ohi. Toisaalta jos varautuminen olisi vain neutraalitörmäysten varassa ilman induktiota ($\beta = 0$), m_1 ja m_2 olisivat molemmat negatiivisia ja eksponenttifunktiot menisivät nollaan ajan mittaan. Jäljelle jäisi vain asymptootinen kenttä E' , jonka arvo olisi tällöin -40 kV/m eli vain kymmenesosa purkauskynnyksestä.

Tämä yksinkertainen malli, jossa käytetyt lukuarvot ovat realistisia, viittaa siis siihen, että varautuminen alkaa tarpeeksi nopeana vain neutraalitörmäysten ansiosta ja saavuttaa läpilyöntikynnyksen vain induktion tuoman vahvistavan takaisinkytkennän avulla.

Varaus saadaan sähkökentästä

$$Q = (\epsilon_0 \partial E / \partial t + \sigma E) / Nw \quad (\text{B.30})$$

ja kun $E = -400 \text{ kV/m}$ ($t = 19 \text{ min}$), lumirakeen varaus on $Q = -8 \cdot 10^{-12} \text{ C}$. "Paikallinen" sähkökenttä lumirakeen pinnalla on silloin

$$E = Q / 4\pi\epsilon_0 R^2 \approx -290 \text{ kV/m} \quad (\text{B.31})$$

eli se jää riittävästi purkauskynnyksen alapuolelle, jotta lumirakeiden varautuminen ylipäättään olisi mahdollista.

Jos oletetaan, että konvektiosolu, jonka halkaisija on 2 km , levittää varautuneet lumirakeet halkaisijaltaan 4 km :n (pinta-ala $A = 4\pi = 12,6 \text{ km}^2$) ja paksuudeltaan yhden kilometrin ($= \Delta h$) kerrokseen, on kokonaisvaraus juuri purkauskynnyksen tuntumassa

$$Q_{\text{kok}} = NQA\Delta h \approx -20 \text{ C} \quad (\text{B.32})$$

ja varausvirta

$$I_v = N|Q|Aw \approx 0,2 \text{ A} \quad (\text{B.33})$$

sekä vuotovirta ($E_{\text{max}} = -400 \text{ kV/m}$)

$$I_h = \sigma E_{\text{max}} A \approx 0,05 \text{ A} \quad (\text{B.34})$$

Nämä arvot ovat suuruusluokaltaan järkeviä, kun oletetaan aktiivisen ukkospilven (-alueen) koostuvan 5-15 solusta.

Kun solu purkaa varaustaan salamana ensimmäisen 20 minuutin varautumisen jälkeen, voidaan olettaa purkauksesta jäävän jäljelle varausta niin runsaasti, että seuraava purkauskynnys saavutetaan paljon nopeammin. Onhan induktio-varautuminen tällöin tehokasta. Tämä selittää suuren monisoluisen ukkospilven salamamäärät.

Liite C Salamapurkauksen fysiikkaa

C.1 Katsaus eri purkauslajeihin

Kuivassa normaalitilaisessa ilmassa tapahtuu kahden tasoelektrodin välillä sähköpurkaus (läpilyönti), kun niiden välinen sähkökenttä on 3 MV/m eli 30 kV/cm. Pilven olosuhteissa vallitsevan kentän purkauskynnys on alempi, sillä vesipisaroiden venyminen pitkulaisiksi tai jää- ja lumikiteiden terävät kulmat voimistavat paikallista sähkökenttää. Läpilyöntikenttä pilvessä onkin vain 400–500 kV/m.

Ionisaatio (liite B.2) synnyttää jatkuvasti positiivisia ioneja sekä elektroneja, jotka tarttuvat melkein välittömästi kaasumolekyyleihin. Jos sähkökenttä ylittää läpilyöntikynnyksen, ionisaation irrottama elektroni ehtii kiihtyä niin paljon, että törmätessään molekyyliin se aiheuttaa lisää ionisaatiota — uusien elektronien irtoamista ja lopulta elektronivyöryn, jolloin *epäitsenäinen purkaus* muuttuu *itsenäiseksi* (riippumattomaksi alkuperäisestä ionisaatiosta). Siinä purkauskanava lisäksi kuumenee niin paljon, että se pysyy ionisoituneena ja johtaa hyvin sähköä.

Sähköpurkauksia on tutkittu paljon, mutta salaman erikoisominaisuudet — esim. metallisten elektrodien puuttuminen ja pitkä purkausmatka — tekevät siitä vaikeasti tutkittavan ja mallinnettavan. Salaman eri vaiheet ovat myös luonteeltaan erilaisia. Yleiskatsauksen niihin antavat mm. Berger (Golde, 1977), Uman (1984) ja Magono (1980), ja uudempia näkemyksiä löytyy esim. artikkelista Heckman & Williams (1989). Helposti esitettävien mallien puutteessa tässä joudutaan kuvailemaan useimmat purkausvaiheet sanallisesti ja melko ylimalkaisesti, ja vain pääsalamaa tarkastellaan matemaattisen mallin avulla (kohta C.2).

Pilvessä tapahtuva tai pilvestä alkava purkaus lähtee liikkeelle todennäköisimmin positiivisista hiukkasista, pilvisalamassa ja positiivisessa maasalamassa yläosan jääkiteistä ja negatiivisessa salamassa ehkä alaosan positiivisista lumirakeista. Tämä johtuu siitä, että ilman ionisaatiossa syntyvä elektroni syöksyy lähellä olevaa positiivista hiukkasta kohti voimakkaasti kiihtyvällä nopeudella, koska sähkökenttä on hiukkasen pinnassa suurimmillaan. Hiukkasen ympärille syntyy näin positiivinen *soihstupurkaus*, jossa uutta varausta syntyy runsaasti ja sähköjohtavuus on suuri. Negatiivinen hiukkanen puolestaan hylkii elektroneja kauem-

maksi heikompaan kenttään, eikä purkaus muutu itsenäiseksi yhtä helposti. Kun positiiviset soihstupurkaukset esim. pilven alaosassa saavuttavat negatiivisen varauskeskuksen, täyttyy sähköä johtava kanava nyt negatiivisista lumirakeista peräisin olevilla elektroneilla, jotka alkavat syöksyä kohti alaosan positiivista aluetta ja edelleen kohti maassa olevaa positiivista varausta. Tässä kuvattu tapahtumasarja käsittää negatiivisen maasalaman valmisteleavan purkauksen ja sen muuttumisen esisalamaksi. Pilvisalamalan alkupuolen soihstupurkaukset ylhäältä kohti negatiivista keskusta syntyvät samalla tavalla.

Pilven alaosan positiiviset lumirakeet eivät ehkä ole välttämättömiä negatiivisen salaman alkamiselle, sillä voimakkaassa sähkökentässä myös esim. pilven alaosan sadepisarot polarisoituvat, muuttuvat pitkulaisiksi ja voivat synnyttää ylöspäin eteneviä positiivisia soihstupurkauksia. Tähän saattaa liittyä myös salaman yhteydessä esiintyvä saderyöppy (kohta 3.1).

Esisalamalan merkittävin piirre on sen eteneminen nykyksittain noin 25 m pituisina askelina, joiden kasvaminen tapahtuu suhteellisen nopeasti, noin yhden mikrosekunnin aikana. Askelen välillä se näyttää pysähtyvän peräti 50 us ajaksi, ja näin esisalamalan keskinopeus jää 500 km:iin sekunnissa, alle sadasosaan pääsalaman nopeudesta. Pysähtely näkyy selvästi esim. aikaerotteluvalokuvissa. Vaikka esisalama on paljon himmeämpi kuin pääsalama, esisalama haaroineen erottuu valokuvissa kanavana, jonka paksuus on 1 cm luokkaa. Ratkaisevaa esisalamalan ymmärtämiselle on, mitä tapahtuu askelen välisen 50 μ s "tauon" aikana.

Negatiivisen esisalamalan valaiseva, ohut ja nopea askel pysähtyy, kun se törmää normaalitilaiseen ilmaan (jossa on vain kauniin ilman sähköisyyteen liittyvää heikkoa ionisaatiota). Tässä vaiheessa askeleen kärjessä on runsaasti negatiivista varausta ja voimakas sähkökenttä — tilanne muistuttaa liitteessä B.3 esitettyä kohoutumaa. Kärkeen muodostuu negatiivinen *koronapurkaus*, joka on liian tehoton synnyttäkseen sanottavasti valoa. Ilma ionisoituu kuitenkin sen verran, että syntyvä *koronakanava* kasvaa kohti ionisoitumatonta ilmaa, enimmäkseen kärjen suuntaan, mutta jossain määrin myös sivulle. Tätä hidasta ja jokseenkin näkymätöntä vaihetta voidaan kutsua *pilottipurkaukseksi* tai *hakupurkaukseksi*, joka "etsii" uutta purkaustietä ja voi alkupisteessään myös haarautua. Koronakanavan kasvaessa paitsi pituutta myös paksuutta sen sähkökenttä ei voimistu, koska varaus jakautuu yhä suurempaan tilavuuteen, ja lopulta purkaus pysähtyy, kun pituus on n. 25 m ja aikaa on kulunut 50 μ s. Koronakanavan paksuus on silloin 10 metrin luokkaa. Lämpötila nousee muutamaan tuhanteen asteeseen, jolloin kanava pysyy tarpeeksi ionisoituneena (sähköä johtavana) seuraavaa valaisevaa esisalama-askelta varten: tämä syöksyy pitkin kanavan keskiosaa ja varaa koko kanavan negatiiviseksi. Voidaan sanoa, että tässä himmeä *hohtopurkaus* muuttuu kirkkaaksi *valokaaripurkaukseksi*. Aiempiin esisalamakanavan osiin tulee pilven negatiivisesta keskuksesta uutta varausta, joka varastoituu näkyvän kanavan ympärille poikittaisiin koronapurkaussäikeisiin; pääsalama neutraloi ne edetessään ylöspäin.

Pilottipurkauksen nopeuden määrää paikallinen sähkökenttä kaavan

$$u = a(E - E_c) \quad (C.1)$$

mukaisesti, joka sopii erääksi lähtökohdaksi pilottipurkauksen mallinnuksessa (Klingbeil & Tidman, 1974). Vakioiden arvot ovat $E_c = 2 \text{ MV/m}$ ja $a = 0,1 \text{ m}^2/\text{Vs}$.

Positiivisen maasalaman esisalama etenee pilven yläosasta positiivisena soihtupurkauksena, jonka tehokkuus riittää kuumentamaan kanavaa johtavaksi jatkuvasti, ilman pysähdyksiä. Aikaerotteluvalokuvassa se näkyy heikosti valaisevana, vain tasaisesti etenevä kärki on kirkkaampi (Berger, ks. Golde, 1977, s. 173). Pysähdysten puuttuessa myös haaroittuminen ja mutkittelu on vähäistä, joten positiivisen pääsalaman jyrähdys lienee terävämpi kuin negatiivisen. "Tehokkaampi" esisalama saattaa olla syynä myös siihen, että positiivinen salama pystyy purkamaan energiansa jo yhdellä, negatiivista voimakkaammalla pääsalamalla. Tämä on kuitenkin vain arvelua, koska havaintotietoa positiivisista salamoista on vielä niukasti. Harvinaisemmissa maasta (lähinnä korkeista mastoista) ylös etenevissä esisalamoissa polaarisuus (varauksen merkki) vaihtuu: negatiivisella maasalamalla on positiivinen esisalama ilman askelia ja positiivisella maasalamalla negatiivinen ja askeltava.

Vaikka pääsalamaakin on vaikea kuvata mikroskooppisesti, sen makroskooppinen mallintaminen on helpompaa, koska sähköä johtava kanava on jo valmiina. Negatiivisen pääsalaman juuri alkaessa kanavan koronavaippa on negatiivisesti varattu (elektroneilla) ja maassa sen kärjen lähellä on positiivista varausta (elektronien vajausta). Pääsalaman edetessä alhaalta ylöspäin prosessi on seuraavanlainen: elektronit syöksyvät kanavan alapäästä maahan neutraloimaan positiivista varausta; positiivinen maa vetää niitä puoleensa niin voimakkaasti, että kanavan alaosa tyhjenee elektroneista muuttuen varaukseltaan positiiviseksi ja tavallaan samaksi elektrodiksi kuin maa. Tämä elektrodi varaa seuraavan kanavanosan positiiviseksi jne. (prosessi on jatkuva eikä nykäyksittäinen kuten tästä kuvauksesta voisi luulla). Positiivinen kanavan alaosa kasvaa nopeasti pilven varausalueeseen saakka. Samalla kanavan ohut keskiosa kuumenee voimakkaasti ja valaisee kirkkaasti. Matemaattinen malli tälle tapahtumalle esitetään kohdassa C.2.

Nuolisalama eroaa ensimmäisestä esisalamasta siinä, että sähköä johtava kanava on valmis ja lisäksi kuuma pääsalaman jäljiltä. Nuolisalama etenee siinä pilvestä alaspäin tulevana, tasaisella nopeudella kulkevana elektronien iskuaaltona (aaltoliikkeessä yksi elektroni kulkee vain lyhyen matkan). Sen edellyttämän elektronien "ylipaineen" aiheuttaa pilven negatiivinen varaus, jota kanavaan virtaa aaltorintaman jäljessä. Pitkittäisen iskuaallon hajoamista ei havaita niinkään ääni-aaltona kuten tapahtuu pääsalaman poikittaisessa laajenemisessa, vaan aalto kuumentaa iskurintaman jäljessä tulevan kanavanosan valaisevaksi n. 50 metrin matkalta, joka nähdään "nuolena" aikaerotteluvalokuvissa (Jurenka & Barreto, 1985).

Tarkastellaan vielä purkausta *kiinteässä* kärjessä. Läpilyöntikynnyksen alittavassa vallitsevassa sähkökentässä saa terävä kärki pilottipurkauksen tapaan paikallisen kentän ylittämään kynnyksen. Kiinteäkärkisen koronapurkauksen luonteeneseen kuuluu kuitenkin, että kentän suunnasta riippumatta se ei pysty etenemään kärjestä kauas heikomman kentän alueelle, jossa se sammuu syttyäkseen kärjen lähellä uudestaan; se esiintyykin peräkkäisinä pulsseina, joiden taajuus on 1 kHz tai suurempi. Purkausvirtaa kuvaa yhtälöä (C.1) muistuttava empiirinen kaava

$$I = b(E^2 - E_c^2) \text{ kun } |E| > |E_c| \text{ ja } I = 0 \text{ kun } |E| < |E_c| \quad (C.2)$$

jossa sähkökentät tarkoittavat vallitsevaa kenttää; kynnysarvo E_c ja vakio b riippuvat kärjen geometriasta. Purkauksessa syntyvät ionit lisäävät sähkövarauksia kärjen ympäristössä ja lisäävät salamaniskun riskiä. Purjelaivojen mastonhuipussa ukonilmalla havaittava kärkipurkaus on nimeltään *Elmon tuli*, ja maalla, esimerkiksi kirkontorneissa, ukkosella näkyviä kärkipurkauksia sanotaan *virvatuliksi*, vaikka tätä nimitystä käytetään myös suokaasun palamisesta.

C.2 Pääsalaman virtamalli ja sähkömagneettinen kenttä

Päinvastoin kuin esisalamien tapauksessa, voidaan pääsalaman kanava olettaa "valmiiksi" johtimeksi, jossa purkaus tapahtuu. Pääsalamaa käsitelläänkin yleensä maasta ylös etenevänä aaltona, jonka kuvaamiseen sopii ns. siirtojohtomalli. Melko selkeä esitys mallista, jonka matematiikka on hieman mutkikasta, löytyy kirjasta Volland (1984). Teoriaa on melko laajasti käsitelty myös kirjassa Gardner (1990). Seuraavassa on yksinkertaistettu kuvaus Vollandin kirjan mallista.

Usein käytetty empiirinen kaava pääsalamavirran aikariippuvuudelle on

$$I = I_0[\exp(-at) - \exp(-bt)] \quad (C.3)$$

jonka vakioiden tyypillisiä arvoja ovat $I_0 = 40 \text{ kA}$, $a = 2 \cdot 10^4 \text{ 1/s}$ ja $b = 2 \cdot 10^5 \text{ 1/s}$. Tämä malli riippuu vain ajasta t eikä paikasta (se kuvaa virtaa kanavan alapäässä), joten kaava ei riitä kuvaamaan pääsalamapulssin etenemistä maasta pilveen. Havaintojen mukaan ensimmäisen pääsalaman kärjen etenemisnopeus hidastuu,

$$u = u_0 \exp(-\gamma t)$$

jossa $u_0 = 10^8 \text{ m/s}$ ja $\gamma = 3 \cdot 10^4 \text{ 1/s}$. Myöhempien pääsalamoiden nopeus kuumen-

neessa kanavassa on vakio. Kanavan johtavuus on $\sigma \approx 10^4$ S/m (Uman, 1984).

Pääsalamaa kuvaava virta-aalto kanavassa koostuu erillisiä taajuuksia vastavista harmonisista värähdysmoodeista $n = 1, 2, \dots$, joita kuvataan sini- ja kosini-funktioilla. Johtamatta tuloksia tässä voidaan todeta, että siirtojohtomallissa aika-riippuvuutta kuvaa funktio $\Lambda_n(t)$, joka muistuttaa yhtälön (C.3) muotoa,

$$\Lambda_n(t) = [\beta_n \exp(-\alpha_n t) - \alpha_n \exp(-\beta_n t)] / (\beta_n - \alpha_n) \quad (C.4)$$

missä kertoimet α_n ja β_n lausutaan virtajohtimen resistanssin R , induktanssin L ja ns. sivukapasitanssin C avulla (β_n vastaa ylempää etumerkkiä ja α_n alemmaa):

$$\beta_n, \alpha_n = R/2L \pm [(R/2L)^2 - K_n^2/(LC)]^{1/2} \quad (C.5)$$

Suure $K_n = (2n - 1)\pi/2$ on ns. normitettu aaltoluku. Aaltoluku saadaan jakamalla tämä kanavan pituudella H , siis $k_n = K_n/H$, ja sen yksikkö on m^{-1} . Moodin n aallonpituus on silloin $\lambda_n = 2\pi H/K_n = 4H/(2n - 1)$; alimman moodin eli pisimmän aallon aallonpituus on siis nelinkertainen kanavan pituuteen verrattuna.

Kunkin moodin n virta I ja jännite U ovat muotoa (z on korkeus)

$$\begin{aligned} I_n(z, t) &= Q_n \cos(k_n z) d\Lambda_n(t)/dt \\ U_n(z, t) &= -Q_n R \sin(k_n z) \Lambda_n(t) \alpha_n \beta_n / [K_n(\alpha_n + \beta_n)] \end{aligned} \quad (C.6)$$

missä Q_n on kunkin moodin osuus kanavan kokonaisvarauksesta; Q_n voidaan helposti määrittää esim. tapauksessa, jossa hetkellä $t = 0$ kanavassa on tasaisesti jakautunut varaus Q . Kun kanavan poikkipinta-ala on A , on virrantiheys $J_n = I_n/A$, ja varaustiheys ρ_n saadaan ns. jatkuvuusyhtälöstä $\partial J_n / \partial z = -\partial \rho_n / \partial t$. Varaustiheys hetkellä $t = 0$ on silloin

$$\rho_n(z, 0) = (Q_n K_n / AH) \sin(K_n z / H) \quad (C.7)$$

ja kun vaaditaan, että $AH \sum \rho_n(z, 0) = Q$ (summassa $n = 1 \rightarrow \infty$), kyseessä on *Fourier-sarja*

$$Q = \sum Q_n K_n \sin(K_n z / H) \quad (C.8)$$

jonka kerroin $Q_n K_n$ saadaan kaavasta (integraalin rajat ovat $0 \rightarrow H$)

$$Q_n K_n = (2/H) \int Q \sin(K_n z / H) dz \quad (C.9)$$

Tulokseksi saadaan

$$Q_n = 2Q/K_n^2 \quad (C.10)$$

joten alimman moodin $n = 1$ osuus kokonaisvarauksesta on $8/\pi^2$ eli 81 %.

Tarkastellaan nyt vain alinta moodia $n = 1$. Yhtälön (C.3) mukainen virta saadaan yhtälöstä (C.6) arvolla $z = 0$, kun $\alpha_1 = a$, $\beta_1 = b$ ja $I_0 = -Q_1 ab/(b - a)$. Jos $I_0 = 40$ kA, on Q_1 edellä mainituilla a :n ja b :n arvoilla $-1,8$ C. Nyt saadaan myös arviot virtajohtimen sähköisille ominaisuuksille. Resistanssiksi tulee $R = H/A\sigma = 6,4$ k Ω , kun $H = 5$ km, $A = 0,785$ cm² (kanavan paksuus 1 cm) ja $\sigma = 10^4$ S/m. Induktanssi on silloin $L = R/(a + b) = 29$ mH ja kapasitanssi $C = K_1^2/abL = 21,3$ nF.

Yhden moodin virta on paikallaan pysyvä, kosinimuotoinen korkeusprofiili (yhtälö C.6), joka vaimenee aikafunktion $\Lambda(t)$ mukaisesti. Se ei siis kuvaa pääsalaman etenemistä maasta pilveen. Etenevä pulssi saadaan yhdistämällä kaikkien moodien ratkaisut. Sitä ei kuitenkaan voi ilmaista yksinkertaisena kaavana, ja laskemista mutkistaa vielä, että n :n kasvaessa α_n ja β_n tulevat kompleksiluvuiksi.

Muuttuva sähkövirta — tai yleensä kiihtyvässä liikkeessä oleva varaus — luo sähkömagneettisen kentän, joka käsittää viisi luonteeltaan erilaista termiä. Esi-merkiksi virta maasalaman pystysuorassa kanavassa välillä (H_1, H_2) synnyttää maanpinnan tuntumassa vaakasuoralla etäisyydellä r sähkömagneettisen kentän (Uman, 1984, s. 274), jonka sähkökentän pystykomponentilla on kolme termiä

$$\begin{aligned} E(r, t) &= (1/2\pi\epsilon_0 D) \left[\int dz' \int dt' I(z', t' - D/c) (2z'^2 - r^2)/D^4 \right. \\ &+ \int dz' I(z', t - D/c) (2z'^2 - r^2)/cD^3 \\ &\left. - \int dz' [\partial I(z', t - D/c)/\partial t] (r^2/c^2 D^2) \right] \end{aligned} \quad (C.11)$$

ja magneettikentän (magneettivuon tiheyden) vaakasuoralla, salamakanavaa vastapäivään kiertävällä komponentilla kaksi termiä

$$\begin{aligned} B(r, t) &= (\mu_0/2\pi D) \left[\int dz' I(z', t - D/c) (r/D^2) \right. \\ &+ \left. \int dz' [\partial I(z', t - D/c)/\partial t] (r/cD) \right] \end{aligned} \quad (C.12)$$

missä korkeusmuuttuja z' integroidaan välillä ($H_1 \rightarrow H_2$), aika t' integroidaan välillä ($0 \rightarrow t$), $D = (z'^2 + r^2)^{1/2}$, ϵ_0 on permittiivisyys, μ_0 magneettinen permeabiliteetti ja c valon nopeus (liite H). Sähkökentän termit ovat nimeltään *staattinen*, *induktio-* ja *säteilykenttä*; ensimmäinen niistä heikkenee nopeimmin etäisyyden kasvaessa. Magneettikentällä on vain induktio- ja säteilytermit. Kaukana salamasta ($r \gg H_1, H_2$ ja $D \approx r$) sähkökentän termien etäisyysriippuvuudet ovat $1/r^3$, $1/r^2$ ja $1/r$ ja magneettikentän $1/r^2$ ja $1/r$. Säteilykentät heikkenevät siis hitaimmin, ja yli 100 km etäisyyksillä vain ne ovat merkittäviä.

Selkeämpi kuva yllä olevista yhtälöistä saadaan, kun havaintopiste on kaukana salamasta, jolloin z' -integraatio voidaan korvata tekijällä H (salamakanavan pituus) ja virta varauksen Q muutosnopeudella ($I = dQ/dt$). Suurella $M = 2HQ$ merkitään varauksen *dipolimomentin muutosta* (tekijällä 2 otetaan huomioon maan peilikuvavaraus). Dipolimomentti on siis varauksen ja etäisyyden tulo, joka kuvaa paitsi varauksen suuruutta myös matkaa, jonka yli purkaus tapahtuu. 20 C neutraloituminen pitkin 5 km salamakanavaa merkitsee 100 Ckm dipolimomentin muutosta. Näillä yksinkertaistavilla oletuksilla voidaan sähkö- ja magneettikenttien lausekkeet kirjoittaa helposti käytettävään muotoon

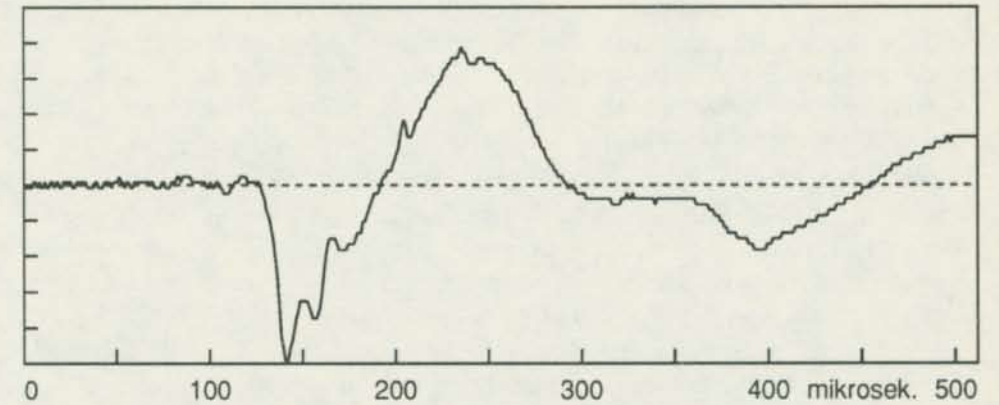
$$E = -(1/4\pi\epsilon_0)[M/r^3 + (dM/dt)/cr^2 + (d^2M/dt^2)/c^2r]$$

$$B = (\mu_0/4\pi)[(dM/dt)/r^2 + (d^2M/dt^2)/cr] \quad (C.13)$$

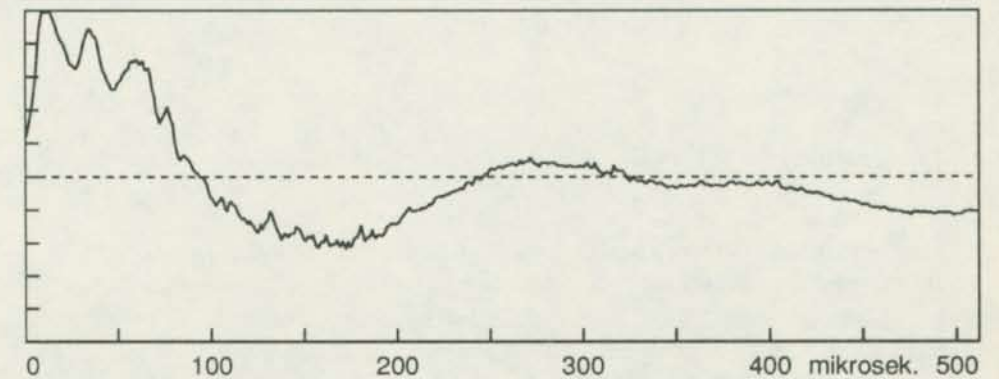
jossa havaintopisteen (E, B) ajanhetkeä t vastaa lähtepisteen (M) hetki $t - r/c$. Laskettuja sähkökenttäpulsseja löytyy mm. julkaisusta Tuomi & al. (1991).

C.3 Salamoiden pulssimuoto

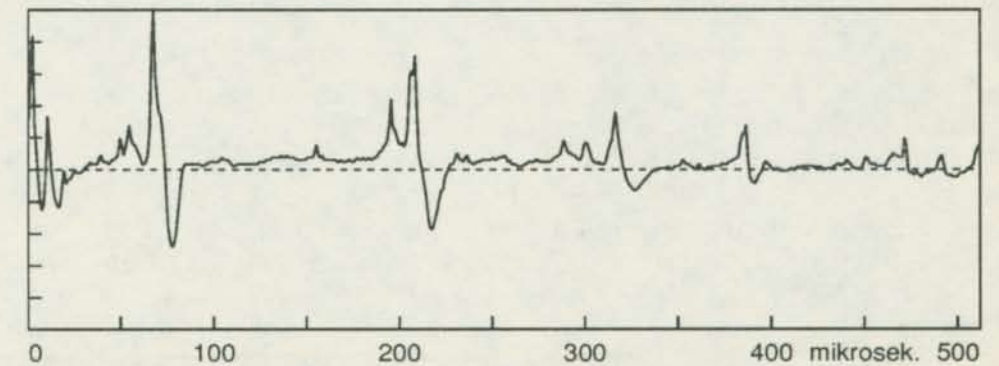
Suomessa on rekisteröity salamoiden sähkömagneettisen kentän pulssimuotoja noin puolen millisekunnin (512 mikrosekunnin) otoksina, joihin mahtuu osa esisalamasta ja pääsalama. Kuvassa C.1 on tyypillinen negatiivisen salaman pulssi, joka on rekisteröity n. 100 km etäisyydeltä ja käsittää siis lähinnä säteilytermin. Kuva esittää sähkömagneettisen kentän sähkökenttäkomponenttia; magneettikenttäkomponentti on hyvin samanlainen. Kuvan vasemmassa reunassa näkyvä nopea heikko vaihtelu on peräisin esisalamasta, ja pääsalama aiheuttaa nopeasti, muutamassa mikrosekunnissa nousevan pulssin, jonka kesto on 40-50 μ s. Pulssi heilahdelee usein vielä puolelta toiselle ennen vaimenemistaan. Pääsalaman voimakkuus eli salamakanavan sähkövirran huippuarvo vastaa pääpulssin korkeutta. Vastavuus tietysti riippuu havaintoetäisyydestä ja rekisteröintilaitteen herkkyydestä.



Kuva C.1 Negatiivisen maasalaman synnyttämä pulssi (sähkökenttä) 512 mikrosekunnin aikana. Pystyasteikko mielivaltainen; nollataso on merkitty katkoviivalla.



Kuva C.2. Positiivisen maasalaman synnyttämä pulssi. Ks. kuvan C.1 teksti.



Kuva C.3. Pilvisalaman synnyttämä pulssi. Ks. kuvan C.1 teksti.

Kuva C.2 esittää positiivista pääsalamaa. Rekisteröinti on hieman myöhästynyt pulssin alusta. Salama on iskenyt melko lähelle, josta syystä mukana on muutakin kuin säteilytermi; tämä näkyy siitä, että pääpulssin jälkeinen vastakkainen piikki on heikompi (vrt. Uman, 1984, s. 62). Pääpulssin kesto on selvästi pitempi kuin kuvan C.1 negatiivisella salamalla.

Pilvisalama koostuu lyhyistä kaksinapaisista pulsseista (kuva C.3), joiden joukossa ei ole maasalaman pääsalamaan verrattavaa leveätä ja voimakasta pulssia. Koska rekisteröintiäika on vain puolisen millisekuntia, kuvaan on mahtunut luultavasti vain yksi kohdan 4.2 lopussa mainituista rekyylipurkauksista tai osa sellaisesta. Rakenne muistuttaa hieman maasalaman esisalamaosaa.

Negatiivisten maasalamoiden pulssimuototarkastelu (Tuomi, 1990) viittaa siihen, että muoto voi joskus erota huomattavasti tyypillisestä. Pulssin pääpiikki voi olla kapeampi kuin 40 μ s (jopa 20–25 μ s) ja sen jälkeinen vastakkainen heilahtus voi puuttua tai hajota nopeaksi heilahteluksi. Silloin suuntimisasema ei useinkaan tunnista maasalamaa, joka näin jää paikantamatta. Suomessa tällaisia maasalamoita on arviolta 15 %. Toisaalta hyväksymisehtojen väljentäminen voisi päästää läpi myös sellaisia radioukkosia, jotka eivät ole peräisin maasalamoista.

C.4 Radioukkokset

Radioaaltoja käyttävä tietoliikenne on nykyään erittäin vilkasta, ja erilaisilla häiriöillä on merkitystä tiedonvälityksen laadun kannalta. Yksi luonnollista alkuperää oleva häiriötyyppi on *ilmastohäiriö*, jolla tarkoitetaan ilmakehän sähköilmiöihin liittyviä radioaaltoja. Tämä nimitys on kuitenkin huono esim. siinä suhteessa, että siitä ei käy ilmi sen sähkömagneettinen luonne, vaan se kuulostaa enemmän meteorologiselta ilmiöltä. Englanninkieliset vastineet *atmospheric disturbance*, pelkkä *atmospheric* tai siitä väännetty *sferic* eivät ole yhtään parempia. Siksi tässä on otettu käyttöön uusi termi *radioukkonen*, joka kaipa ehkä hieman perusteluja:

- häiriö esiintyy radiotaajuuksilla haitaten perinteisesti radion kuuntelua;
- alkuperästä riippumatta häiriö kuulostaa yleensä samantapaiselta kuin ukkosperäinen radiohäiriö.

Kiinnostuksella radioukkosia kohtaan on monia syitä. Nykyään yksi tärkeimmistä on niiden käyttö salamoiden havaitsemisessa ja paikantamisessa. Kuten luvussa 5 todettiin, kaupalliset paikantimet toimivat alueellisina, alle 1000 km kattavina järjestelminä, joita tosin voidaan yhdistää suuremmiksi kokonaisuuksiksi kuten mm. USA:ssa on tehty. Tällaisissa paikantimissa on nimenomaan kysymys pääsalamapulssin havaitsemisesta. Se muistuttaa sellaisen sinikäyrän osaa, jonka jakso on 100 μ s eli taajuus on 10 kHz, osuen ns. VLF-alueelle (very low frequency, 3–30 kHz). Tämän taajuusalueen radioaalloilla on kyky heijastua tehokkaasti

maasta ylöspäin ja ionosfääristä alaspäin ja edetä näin maan ja ionosfäärin muodostamassa *aaltoputkessa* maapallon ympäri vaimentuen suhteellisen hitaasti.

Osa salamapulssin energiasta etenee ikäänkuin ryömien pitkin maanpintaa, *pinta-aaltona*. Ilmakehään etenevä aalto voi heijastua ionosfääristä 1, 2,... kertaa ja niiden välillä taas maanpinnasta. Jos radioukkonen havaitaan etäisyydellä D (mitattuna pitkin kaarevaa maanpintaa), n :s ionosfääriheijastus saapuu hetkeä Δt_n myöhemmin kuin pinta-aalto (ks. esim. Malan, 1963, s.123):

$$\Delta t_n = [D^2(1 + h/R) + 4n^2h^2]^{1/2} - D]/c \quad (C.14)$$

jossa h on heijastuskerroksen korkeus (n. 80 km), R on Maan säde (6370 km) ja c on valon nopeus (liite H). Jos $D = 400$ km, salamansuuntimisaseman havaintosäde, saapuu pääsalaman ensimmäinen ionosfääriheijastus 110 μ s myöhemmin kuin pinta-aalto, joten se ei ehdi sotkea 50 μ s:n pulssin muotoa havaintopisteessä. 600 km:n päässä aikaero on 82 μ s, joten pulssin vääristyminen on jo mahdollista. Kun etäisyys D on pieni tai n suuri, peräkkäisten heijastusten ($n, n+1$) saapumisaikojen ero on $2h/c$ eli tässä tapauksessa 530 μ s.

VLF-alueen radioukkosia käytetään laaja-alaiseen ukkosten havainnointiin etäisyyksillä, jotka ulottuvat viidestäsadasta muutamaan tuhanteen kilometriin (Volland, 1982; Grandt, 1992). Etuna on, että havainnot voidaan tehdä yhdellä ainoalla suuntimisasemalla, mutta etäisyysvirhe on 300 km luokkaa eikä alle 500 km etäisyyksiä voida käyttää. Tarkkuus riittää globaalin ukkosaktiivisuuden mittaamiseen, joka varsinkin valtamerten osalta olisi muuten vaikeaa.

Salamoiden lähettämää suurtaajuisempaa sähkömagneettista säteilyä käytetään paikannukseen kaupallisen asteen saavuttaneessa menetelmässä, jossa suuntimisasemat vastaanottavat VHF-alueen (very high frequency, 30–300 MHz) taa-juuksia ja käyttävät suunnan määrittämiseen interferometriä (Richard & al., 1986).

Perusteellista mutta vaikeasti sulateltavaa tietoa radioukkosista on käsikirjaksi koonnut Volland (1982). Hän on julkaissut myös helpommin omaksuttavan kirjan, joka antaa yleiskuvan sähköilmiöistä sekä ilmakehässä että sen ulkopuolisessa maapallon magnetosfäärissä (Volland, 1984).

Liite D Pallosalama

Pallosalama on osoittautunut yhdeksi vaikeimmin tutkittavista kohteista ilmasähköilmiöiden joukossa. Epäilyksiä pallosalaman aitoudesta on esitetty, mutta vakavaa tutkimusta on harjoitettu parisataa vuotta. Nykyisistä tutkijoista tunnetuimpia ovat Singer (1971, 1991; Golde, 1977, luku 12) ja Smirnov (1987).

Pallosalaman hankalin ominaisuus on sen harvinainen esiintyminen, joten päinvastoin kuin muut salaman muodot sitä ei ole saatu mittalaitteiden ulottuville. Tämä puute on vakava sen ominaisuuksien tarkan analyysin ja teorioiden kehittelyn kannalta. Selvän mittauksiin perustuvan lähtökohdan puuttuminen on saanut aikaan kirjavan joukon teorioita, joista kukin pystyy selittämään vain osan havaituista ominaisuuksista. Havaintoja tosin on runsaasti (ks. myös liite G) ja niitä on 100–200 vuotta kerätty systemaattisesti, mutta tieto pallosalaman muodosta, koosta, väristä, hajusta ja liikehtimisestä ei ole antanut tarpeeksi johtolankoja.

Pallosalaman keinotekoinen luominen laboratoriossa näyttää olevan ainoa tie löytää tyydyttävä teoria. Tässä ei tulla käsittelemään esitettyjen teorioiden viidakkoa, koska useimmat ovat pikemminkin harhaanjohtavia kuin selittäviä. Sen sijaan tukeudutaan varteenotettavimpiin laboratoriotuloksiin ja katsotaan minkälaiseen teoriaan ne ilmeisesti tulevat johtamaan. Tätä ennen tarkastellaan silminnäkijähavainnoista saatua kuvaa pallosalamasta.

Pallosalamat esiintyvät ukkosella, mutta päinvastoin kuin muut salamat, pallosalama leijuu ilmassa vapaasti useita sekunteja. Liikuminen on niin hidasta, että pallon tielle joutuva ihminen saattaa ehtiä väistää sitä.

Suurin osa pallosalamoista on todella pallomaisia, osa soikeita. Pinta voi olla tasainen, mutta sen ympärillä voi näkyä myös kirkkaampi tai säkenöivä kerros. Halkaisijan keskiarvo on 25 cm, mutta havainnot ulottuvat puolesta senttimetristä useaan metriin. Väri on useimmiten oranssi tai punainen, mutta erityisen kirkkaat pallot ovat olleet väritään keltaisesta aina siniseen. Kalevalassa (47. runo, säe 178) esiintyvä ilmaisu "putosi punakeränen" saattaa myös merkitä pallosalamaa.

Jos pallo syntyy korkealla, se yleensä putoaa kohti maata, mutta voi äkkiä muuttaa suuntansa vaakasuoraksi. Meno on usein mutkittelevaa, ja pallo voi kimmotaa esim. maanpinnasta useita kertoja.

Pallosalamoita on havaittu sekä äänettämiä että sihiseviä tai rätiseviä. Myös häviäminen voi tapahtua äänettömästi tai räjähdysmäisesti. Hajuhavainnot viittaavat otsoniin, jota yleisesti syntyy sähköpurkauksissa.

Monissa tapauksissa voidaan pallosalamaksi tulkita havainto, jolle on olemassa "luonnollisempi" selitys, esimerkiksi kirkkaan välähdyksen jälkikuva silmän verkkokalvolla.

Kysymys pallosalamoiden valokuvista on kiistanalainen. Pallosalamoiksi väitettyjä valokuvia on esitetty, mutta niiden autenttisuus on yleensä epävarmaa. Epävarmuus ei sinänsä ole suuri puute, koska kuvat "todistavat" vain sitä mitä näköhavainnotkin osoittavat. Jos esim. valon spektriä voitaisiin analysoida, tilanne olisi parempi, sillä spektri voisi kertoa paljon siitä, mitä pallossa tapahtuu.

Vaikeimmin selitettävä piirre pallosalamassa on sen pitkä elinaika. Ilmassa syntyvä sähköpurkaus häviää sekunnin murto-osassa, ellei siihen tuoda ulkoapäin jatkuvasti uutta energiaa. Tällaisesta energian syötöstä voi olla esim. kysymys, kun sähköpylvään päähän ilmestyvä tulipallo liikkuu pitkiä matkoja pitkin sähköjohtoa. Jos ulkopuolista energian syöttöä ei ole, tarvitaan purkauksen ylläpitoon joko sisäinen energianlähde tai purkausta hidastava tekijä. Hidasteeksi on ehdotettu mm. magneettikenttiä, pyörteitä tai niiden yhdistelmiä.

Tilanteet, joissa on laboratoriossa saatu aikaan pallosalaman tapaisia ilmiöitä, ovat radioaalloilla synnytytetyt kaasupurkaukset, laimeat ilma-polttoaineseokset sekä metallikärkipurkaukset (Singer, 1991; Ohtsuki & Ohurton, 1991).

Pallosalaman kaltaisia tulipalloja on havaittu myös sukellusveneiden ja lentokoneiden läheisyydessä (Golka, 1992). Golka on saanut aikaan sellaisia syötämällä matalassa astiassa veden alla oleviin metallielektrodeihin esim. 60 Hz vaihtovirtaa (10 kA ja 15 V tai 1500 A ja 100 V). Veden pinnalle nousee tanssimaan 2–5 sekunnin ajaksi senttimetrin kokoa olevia tulipalloja; ne voivat pudota lattialle tai niitä voi pyydystää puukauhaan. Pallot ovat kuumia ja niiden väri kertoo elektrodimetallin palamisesta, jossa pientä sulaa ydintä ympäröi metallihöyryvaippa. Jäljelle jää muru palamatonta metallia. Energiaa lisäämällä voidaan saada aikaan suurempia ja pitkäikäisempiä palloja.

Singer (ks. Golde, 1977, luku 12) mainitsee myös tutkimuksen, jonka mukaan pallosalamahavainnot olivat 1800-luvun alussa erittäin harvinaisia (paitsi vuoden 1889 paikkeilla, kun sähköilmiöt yleensä alkoivat saada osakseen suurta huomiota) ja lisääntyivät tultaessa 1900-luvulle. On siis mahdollista, että pallosalamoiden esiintyminen olisi lisääntynyt. Jos pallosalamassa on kyse metallin palamisesta, lisääntyminen voisi johtua yksinkertaisesti siitä syystä, että teollistuneena aikana on metallin määrä ympäristössä lisääntynyt valtavasti, varsinkin asutuilla alueilla, joissa mahdollisia havaituspaikkoja on runsaasti. Barry (1979) on todennut, että havaintojen määrä on 1900-luvulla pysynyt melko vakana.

Pallosalaman selittämiseen ja kunnollisen teorian luomiseen on vielä pitkä matka, mutta ratkaisevaa edistystä on ehkä odotettavissa lähivuosina.

Liite G Kuvauksia salamatuhoista

Tämän kirjan päätarkoitus on antaa fysikaalista tietoa ukonilmoista ja niiden tuotamista salamoista. Salama on kuitenkin niin oikullinen ilmiö, että sen käyttäytymisen ymmärtäminen pelkästään tieteelliseen, systemaattiseen tietoon perustuen näyttää jäävän vajavaiseksi. Mielikuvaa salaman olemuksesta voidaan siksi syventää silminnäkijäkuvauksilla ja lehti uutisilla salamatapauksista. Korostettakoon, että silminnäkijähavainnot eivät yleensä *selitä* salaman ominaisuuksia eivätkä täytä tieteelliselle havainnoinnille asetettavia vaatimuksia. Niitä lukiessa ehkä kuitenkin lukija mielessään löytää yhtymäkohtia muualla tässä kirjassa esitettyihin asioihin ja onnistuu näin elävöittämään omaksumaansa tietoa.

Noin sata vuotta sitten, v. 1887, aloitettiin Suomessa järjestelmällinen salamoiden havainnointi Ilmatieteen laitoksen edeltäjän, Suomen Tiedeseuran alaisen Meteorologisen päälaitoksen toimesta. Aloitteentekijänä oli A.F. Sundell, ja alkujaan ruotsiksi julkaistut ukonilmaraportit käännettiin suomeksi ja painettiin Suomalaisen Kirjallisuuden Seuran painossa nimellä *Ukonilmat Suomessa* (1887-1902, Sundell ja W. Öhquist) ja *Ukonilmoista Suomessa* (1903-1906, H. Karsten ja R. Jurva); seuraavassa tarkoitetaan nimellä *Ukonilmat Suomessa* näitä molempia. Karstenin ja Jurvan raportit ovat hyvin perusteellisia ja niihin on koottu myös aiempaa tarkempia kuvauksia yksittäisistä salamavahingoista. Tähän on poimittu sellaisia kuvauksia, jotka saattavat olla paitsi kiinnostavia myös opettavaisia nykyistäkin salamariskiä ajatellen. Vuodesta 1907 lähtien Meteorologinen päälaitos (myöhemmin keskuslaitos) alkoi julkaista säähavainnoista kuukausikatsauksia, joissa ukkostiedotkin esitettiin vain yhteenvetoina. Tosin ajoittain niissä julkaistiin myös vahinkokuvauksia.

Salamatuhoista on silti edelleen lehdissä uutisia. Niissä toistuvat pääosin samankaltaiset tapaukset kuin sata vuotta sitten julkaistuissa. Toinen puoli tähän kootuista kuvauksista on poimittu sanomalehdistä lähinnä 1980-luvulta ja 1990-luvun alusta. Koko sadan vuoden jakson järjestelmällinen kattaminen tuskin toisi esille salamoista olennaisia lisäyksiä siihen kuvaan, joka tähän valittujen tapausten perusteella muodostuu. Uutisten valinta on tehty melko mielivaltaisesti eikä sitä ole edes pyritty painottamaan esim. ukkosjaksojen rajuuden mukaan. Monet viimeaikaiset kovat ukkoset jäävät tässä mainitsematta.

Seuraavat vanhat kuvaukset ovat siis peräisin yllä mainituista julkaisuista *Ukonilmat Suomessa*. Ne on esitetty aikajärjestyksessä ja alkuperäisessä kieliasussaan. Myös kursivointi ym. on alkuperäistä.

Pallosalama nähty Auran rautatien-asemalla Toukok. 21 p. 1887. Näöltään pallon muotoinen, lävistäjä arviolta 2 tuum., yläpuoli hiukan venynyt. Tulikuulaa seurasi suora, jalan pituinen tuli-juova noin 2 jalan päässä itse pallosta; tämä tuli-juova sammui ennenkuin pallo. Väri keltaisen-sininen hiukan punervalla ulko-reunalla. Nopeus ei ollut suurempi kuin että ilmiötä hyvin voi katsella ja arvattiin sen etäisyys tarkastajasta 50 tai 60 jalaksi. Useampia tuollaisia pallosalamoita sanotaan aseman joukkokunnan nähneen.

Pallosalama Heinäk. 3 p. 1887 Sipoon Mårtensbyssä. Heti tavallisen salaman jälkeen, joka näytti nousevan läheisestä korkeasta vuoresta, läksi samasta vuoresta NE:hen päin noin 1 kyynärän läpimittainen tulipallo, kulki noin 10 sylen päässä puunlatvoista räjähtämättä ja katosi näkyvistä. Ensi salamaa seurasi huumava paukaus, mutta hurjasti rientävä tulipallo vaikutti samallaisen jymynä, joka kuuluu junan kulkiessa jonkun virstan päässä. — Samalla kellonlyömällä nähtiin Orimattilassa SW:ssä räjähtävä tulikuula. Kenties nämä havainnot koskevat samaa ilmiötä. Näitten kahden paikan väli on noin 50 kilometriä.

Heinäveden kirkkoon iski salama katkismussaarnan aikana sunnuntaina Heinäk. 5 p. 1887. "Eri puolilta löi tulipalloja kirkon sisään, jossa ne keskellä risteyksen kohdalla räiskäen näyttivät ikäänkuin yhtyvän, niin että lähimpänä istuvat, sekä miesten että naisten puolella, menivät ikäänkuin tainnoksiin. — — — Saarnaajan nähtiin katoavan ja luultiin kuolleen. Hän tuli kuitenkin vahingoittumaton alas saarnatuolista, vaikka tulipallo oli suhissut hänen päänsä ylitse, niin että hän tunsin sen ikäänkuin sipaisevan tukanrajaa, ja peittyi tomuun saarnatuolista. Siellä täällä nähtiin jonkun vaipuvan alas niikuin kuolleen, — — — ruvettiin virvoittelemaan tunnottomia, joista yhtä, joka juuri äsken oli saattanut sisar-vainajataan hautaan, kumminkaan ei enää voitu eloon herättää. — — — Kun kumminkaan mitään tulta ei näkynyt kirkossa, toivottiin sen jääneen vahingoittumatta ja oltiin jo aikeessa jatkaa jumalanpalvelusta — — — kun joku niistä, jotka olivat menneet kirkosta, palasi ilmoittaen, että savua näkyi nousevan kupukatosta, joka parissa tunnissa paloi poroksi".

Heinäk. 18. 1887 sattui ukonlyömä Pihlajavedellä. 27 eläintä kuoli, jotka olivat etsineet suuren puun suojaa korkealla vuorenharjulla; puu meni pirstaleiksi, suuria kivilohkareita repesi vuoresta ja lensi pitkiä matkoja.

Heinäk. 21. 1888 ukonisku Mouhijärvellä. 8 sähkölennätinpylvästä musertui, salama näytti kulkevan pallona pitkin sähkölennätinlankaa, eräs hevonen kaatui.

Toukok. 30. 1889 Luvialla salama iski pienen loistavan pallon muotoisena torppaan seinänraosta ja tappoi erään pojan.

Elok. 13. 1889 Hankasalmella ukonisku tuli tupaan avonaisen lieden kautta, jolloin muutama vaimo meni tainnoksiin.

Heinäk. 30. 1890 Nilsia. *Ukonisku* tappoi kalastajan, joka oli hakenut suojaa heinäkuhjon alta.

Heinäk. 2. 1895 Säkkijärvi. *Ukonisku* surmasi miehen ja haavoitti kahta muuta, jotka olivat etsineet suojaa puun alta.

Elok. 24. 1985 Alatemmes. "Sähkötuli" (Pyhän Elmin tuli) asettui kaivo-tolppaan, jota pitkin äänenlennättimen maajohto kulkee, ja loisti kirkkaasti viisi minuuttia leimuavalla valolla.

Heinäk. 8. 1900 Lemissä iski ukkonen erääseen tupaan, tuli sisään ikkunan pie-lustan kautta, iski erääseen penkillä istuvaan tyttöön korvan kohdalta ja tuli ulos isonvarpaan kohdalta, tehden reiän kenkään.

Kesäkuun 2 p. 1903 Nivala. Erääseen mäntyyn, noin 10 km. S:ssä pappilasta, iski ukkonen. Isku tappoi 4 lehmää, jotka olivat menneet puun suojaan.

Kesäkuun 22 p. 1903 Tuusniemi. Salama tuli sisään erään tuvan uunin kautta ja sytytti erään takan ääressä seisovan naisen vaatteet.

Heinäkuun 16 p. 1903 Tuusniemi. Lapinjärvellä särki ukonisku myllyn ja tappoi toisen myllyssä olevista kahdesta hengestä. Kuolleen kultakello suli.

Kesäkuun 3 p. 1904 Perniön aseman läheisyydessä pirstoi salama sähkö-lennätin-pylvään ja löi 18 (?) rata-työmiestä tainnuksiin; kolmelta vahingoittuivat vaatteet ja heidät täytyi viedä lääkärille Saloon.

Heinäkuun 17 p. 1904 Uurainen. Salama iski 3 km. SE:hen kirkolta olevaan torppaan. Salama tuli huoneeseen seinän kautta, sytytti erään kudoksen, pirstoi seinäkellon sekä poistui lopuksi ikkunan kautta. Huoneessa oli sattumalta 6 henkeä, mutta ei kukaan vahingoittunut, tunsivat vaan jonkinlaista pahoinvointia jälestäpäin.

Kesäkuun 2 p. 1905 Laihia. Ukkonen iski asemarakennukseen sulattaen tele-fonijohdon ja kärventäen apparatin. Sitä paitsi oli ukkonen muutaman kilometrin päässä länteen asemalta pirstonut muutamia telefonipylväitä.

Kesäkuun 29 p. 1905 3 km:n päässä Lappträskin Kappelbystä, Lindkosken kylässä syttyi ensin salamaniskusta navettarakennus sittemmin 5 riihtä ja monta (?) muuta rakennusta, jotka kaikki paloivat. Eräässä kohden oli salama kyntänyt muu-taman sylen pituudelta maata.

Heinäkuun 29 p. 1905 Forssassa tappoi salama kaksi 10-vuotiasta tyttöä. Tytöt olivat etsineet suojaa erään kuusen alta, joka salaman iskiessä kumminkin pysyi vahingoittumatta.

Elokuun 3 p. 1905 Pälkjärvi. Noin 7^hp kuului ankara jyrähdys. Samalla tunkeu-tui "ukkostuli" eräässä rakennuksessa oven kautta tupaan sekä poistui toisen oven kautta.

Elokuun 12 p. 1905 Alavus Norviiki. Salama, jota heti seurasi kova isku, ilmes-tyi punertavana juovana. Se oli "alas-iskevä" ja sen alapäässä oli auringonkokoi-nen ympyriäinen pallo, josta sitten lähti kaidempi varsi.

Heinäkuun 27 p. 1906. Varhain aamulla ja myöhemminkin päivällä raivosi an-kara ukonilma Ahvenanmaalla. Salama iski useampaan kertaan. Niin yöllä 26 ja 27 p:n välillä Flakan kylässä erääseen rakennukseen särkien ikkunoita ja sytyttäen sen eräästä nurkasta. Senjälkeen kun salama oli kiertänyt rakennuksen ulkopuolitse tunkeutui se erääseen huoneeseen ja kulki m.m. erään vuoteen, missä kaksi lasta nukkui, alitse. Vähääkään lapsia vahingoittamatta kosketteli se huoneessa olevia esineitä, lattiaa ja kattoa sekä vahingoitti pienemmässä tai suuremmassa määrässä näitä.

Elokuun 22 p. 1906 sattui Anttolan pitäjässä Ruokolahden kylässä ukonisku, joka tappoi nuoren naisen, löi tainnuksiin toiseen ja vahingoitti kolmatta, heidän ollessaan viljanleikkuussa. Sattunutta ankaraa raesadetta menivät nimittäin kaksi sisarta pakoon pyrkien niityn luona erään aidan takana olevan puun alle suojaan. Juuri kun he olivat päässeet puun suojaan ja kun heitä seurannut palvelijatar oli päässyt aidalle, iski salama puuhun. Toinen puun alla olevista sai heti surmansa, toinen kaatui tiedoton maahan. Revittyään puun juuret maasta salama heitti ai-dalla istujan maahan sekä pirstoi aidan.

Seuraavat ukonilmojen ja salamatuhojen kuvaukset ovat muutamalta viime vuo-delta lukuunottamatta vuonna 1960 Helsingissä esiintynyttä ukonilmaa ja vuodelta 1936 olevaa, uudelleen julkaistua uutista. Kuvaukset perustuvat lehti uutisiin, enimmäkseen *Helsingin Sanomissa* julkaistuihin (muut lähteet on ilmoitettu erik-seen), mutta käsittävät niistä vain lyhyitä otteita. Päivämäärä viittaa ukkosen esiin-tymisajankohtaan.

19.7.1936 (Helsingin Sanomat 50 vuotta sitten). Harvinainen salamaloisto yö-lisen Helsingin yllä. Taivas valkoisena liekkimerenä pommisalamien kirkastama-na. Salama "soittelee" valtion puhelinkeskuksen neitosille. Koko taivas tuntui toi-sinaan olevan kuin yhtenä liekkimerenä. Salamia seurasi pian rankkasade. Sala-mien outo muoto herätti myös suurta hämmästyä, sillä paitsi pallomaisia sala-moita, saattoi selvästi nähdä moniin pieniin osiin murtuneita pitkiä salama-"säiliä".

26.7.1960. Vasta aamuyöstä kello 5 aikaan laantui ukkossää, jollaista ei mies-muistiin ole koettu Helsingissä. Se saapui tänne Baltiasta jatkuvina aaltoina, jotka toivat mieleen sodanaikaiset suurpommitukset. Ajoittain salama iski jopa yli 100 kertaa minuutissa ja taivas oli kauttaaltaan valkoinen. Sade loppui pääkaupungissa vasta 6.30, johon mennessä vettä oli ennättänyt tulla 88 mm. — Salamakatto peitti Porvoon, jättiläisrakeet särkivät ikkunoita. Kaatunut metsä reunusti aamulla tulo-väyliä Porvooseen sekä Helsingistä että idästä. Myös puhelinyhteydet oli kaatunut ja langat riippuivat sekavina vyyhteinä. — Lahdessa salamoi seitsemän tuntia. Kaikkialla Lahden ympäristössä ovat puhelin- ja sähköjohdot olleet ukkosilman jäljiltä epäkunnossa. — Muuntaja räjähti salaman iskusta Hämeenlinnassa. (*Uusi Suomi*)

7.7.1985. Salama iski alumiinimastoon: kuin pommi olisi räjähtänyt veneessä.

Taivaan synkistyessä kokenut purjehtija päätti laskea purjeet ja ankkuroida veneen. "Odoteltiin ukkosmyräkän ohimenoa ja suunniteltiin juuri kahvin keittoa, kun jyrähti. Ensimmäinen ajatus oli, että veneessä räjähti pommi, koska vene oli hetken aivan sokaisevan kirkkaana ja jysäys oli korvia huumaava." Veneen loki (matka- ja nopeusmittari) oli muuttunut kuparin väriseksi ja lakannut toimimasta. Maston huipussa olevasta LA-puhelimen antennista oli vain pieni piikki jäljellä. (*Seura*)

11.-12.8.1985. Lauantaina kaakosta alkanut ja Suomen yli edetessään pahaa jälkeä tehnyt ukkosmyrsky ehti Pohjois-Suomeen sunnuntaina iltapäivällä. Oulussa ja sen ympäristössä myteri yltyi sellaiseen raivoon, että sadat Oulun puistojen puut katkesivat ja kymmenet peltikatot irtosivat. Äkäinen puuska kaatoi Oulun lentokentällä pienkoneen. Yksin Oulun kaupungin alueen myrskytuhot arvioidaan useiksi miljooniksi markkoiksi. Tornionjoella puuska nostatti pikaveneen ilmaan, jolloin toinen veneessä olleista miehistä hukkui. — Lahden seudulla ukkosmyrsky kaatoi hehtaareittain puita, sytytti useita pieniä tulipaloja, katkoi sähköjä, kolhi jät-tirakeilla autoja ja lennätti kattoja.

24.4.1986. Vuodenaikaan nähden harvinainen ukonilma vyöryi Suomen etelä- ja keskiosan yli lounaasta kaakkoon ja kohteli varsin huonosti eritoten Tampereen seutua. Salama iski Nokialla kaikkiaan neljään taloon. Kaikki iskut tulivat puhelinkaapeleita pitkin, ja kaikissa tapauksissa vaurioituivat sekä puhelin- että sähköjärjestelmät. Yhden talon pihassa salama silpoi ison koivun pirstaleiksi ja teki syvän montun routaiseen maahan.

3.6.1986. Arvokas hirsihuvila paloi Koskella. Salama iski huvilan viereiseen puuhun ja johtui siitä yläkerran makuuhuoneeseen. Paikalla ollut omistaja yritti turhaan heittää palamaan syttynyttä patjaa ulos ikkunasta.

12.6.1986. Salama tappoi jalkapalloilijan pelikentällä Jämsässä. Myös vieressä ollut mies kaatui salaman iskusta, mutta hän ei loukkaantunut.

8.7.1986. Kauhavalla salama iski koivuun, josta se maata myöten eteni kymmenen metrin päässä sijaitsevaan ulkorakennukseen sytyttäen sen palamaan. Salama yritti palonalkua myös päärakennukseen iskemällä televisioon.

16.7.1986. Raju ukkosmyrsky ja raekuuro koettelivat Hämeenlinnan seutua. Kolmostien autoilijat joutuivat hetkeksi keskelle kolmenkymmenen sentin lumi-kinosta.

5.8.1986. Salama iski Helsingissä kerrostalon pyöräkellariin. Isku osui pihaan rakennuksen viereen ja eteni maan sisällä talon alle. Betoninen kellarin lattia kohosi rysähdyksessä puolisen metriä.

31.5.1988. Salamasta alkunsa saanut tulipalo kärvensi saunaa Pälkäneellä. Salama iski saunan viereiseen koivuun ja eteni siitä ilmeisesti peltikattoja pitkin saunan takahuoneeseen. — Ukkonen iski salaman Tiirismaan radioaseman syöttöjohtoon ja räjäytti Lahden energialaitoksen ukkossuojaukset pirstaleiksi.

8.6.1988. Salama iski Raision kirkkoon (rak. 1305) ja sytytti kirkontornin tuleen. Edellisestä sammutustehtävästään palaamassa ollut palokunta saapui kirkolle

parissa minuutissa. Palossa hiiltui ainoastaan tornin katon kannatinparruja. Palon uskotaan syttyneen ylikuumenemisesta salaman lyötyä tornin huipulla olevaan ukkosenjohdattimeen. Suntio oli aiemmin arvellut, että ukkosenjohdatin ei ehkä kestä rajua salaman iskua.

25.6.1988. Juhannuspäivänä kahdesta suunnasta yhtäaikaaisesti Ylistaron kohdalle osuneet ukkosrintamat aiheuttivat ennenäkemättömän jääsateen ja metelin. Läpimitaltaan jopa 30 millimetrin suuruiset rakeet aiheuttivat tuhoaan noin kymmenen minuutin ajan. "Jälki oli kuin silppuri olisi yliajanut. Pelloilla viljat ovat poikki, vain sänki on jäljellä. Puutarhoista marjapensaiden lehdet ja marjojen raakileet ovat varisseet." Ylistaron kirkosta särkyi noin kaksisataa 140 vuotta sitten asennettua ikkunarautua.

3.7.1988. Salama surmasi pojan veneeseen. Veneen kokassa istunut poika kaatui ukonilman aikana tajuttomana veneen pohjalle.

6.7.1989. Heinäveden kirkonkylän länsireuna oli sananmukaisesti rajumyrskyn jäljiltä. Kymmenet paksut kuuset ja koivut sekä parinkymmenen metrin mittaiset männyt olivat muuttuneet taivasta kohden töröttäviksi rungonpuolikkaiksi. "Ilma oli täynnä kaatuilevia puita." Lukuisiin taloihin pääsi vain raivausmiesten avulla.

12.8.1991. Salama tappoi sähköasentajan iskettyään muuntajapylvääseen, jossa asentaja oli ukonilman aikaan korjaamassa sähköhäiriöitä.

3.8.1992. Orivedellä salama silpoi kesämökin ja kuusen mökkikylässä. Salamaniskun voimasta mökin seinät kaatuivat ja ikkunat lensivät ulos, ja mökin jäänökset syttyivät saman tien palamaan. (*Aamulehti*)

12.8.1992. Ukkonen sinkoili valtavia rakeita. Viisi- ja kuusisenttiset rakeet moukaroivat talojen kattoja ja vahingoittivat paikoin autoja Kälviän ja Lohtajan seuduilla. Rakeet sulivat hyvin nopeasti, sillä maa oli lämmin noin 30-asteisen päivän jälkeen. (*Keskipohjanmaa*)

Liite H Suureet ja mittayksiköt

Tässä kirjassa käytetään kansainvälisen SI-järjestelmän mukaisia mittayksiköitä sekä etuliitteitä, joilla ilmaistaan lukuarvojen kerrannaisia (suurin poikkeus SI-yksiköistä on röntgen). Koska perustekstissäkkin vilahtelee suureiden lukuarvoja ja yksikköjärjestelmä on todennäköisesti monille lukijoille outo, selitetään tässä lähinnä sellaisten yksiköiden ja etuliitteiden merkinnät, joita kirjassa esiintyy. Suureen merkitsemistapa määritellään aina myös ao. yhteydessä.

Yksikköjen kerrannaisia merkitseviä etuliitteitä

merkki		desimaalimuoto	eksponenttimuoto
f	femto	0,000 000 000 000 001	10^{-15}
p	piko	0,000 000 000 001	10^{-12}
n	nano	0,000 000 001	10^{-9}
μ	mikro	0,000 001	10^{-6}
m	milli	0,001	10^{-3}
k	kilo	1000	10^3
M	mega	1000 000	10^6
G	giga	1000 000 000	10^9

Perusyksiköitä

suure	merkintä	yksikkö	lyhenne
pituus	z, L	metri	m
aika	t, T	sekunti	s
		minuutti	min
		tunti	h
massa	m	kilogramma	kg
sähkövirta	I	ampeeri	A
lämpötila	T	kelvin	K (0 K = -273,15°C)
		celsiusaste	°C

Johdannaisyksiköitä

suure	merkintä	yksikkö	lyhenne
taajuus	ν (nyy)	hertsi	Hz = 1/s
voima	F	newton	N = kg m/s ²
paine	p	pascal	Pa = N/m ²
energia	W	joule	J (1 kWh = 3600 kJ)
teho	P	watti	W = J/s
sähkövaraus	q	coulombi	C = As
jännite, potentiaali	U, V	voltti	V = W/A
konduktanssi (johtokyky)		siemens	S = A/V
resistanssi (vastus)	R	ohmi	$\Omega = 1/S = V/A$
induktanssi	L	henry	H = Vs/A
kapasitanssi	C	faradi	F = C/V

Muita suureita ja yksiköitä

suure	merkintä	yksikkö	lyhenne
nopeus	u	metri/sekunti	m/s
sähkökenttä (sähkökentän voimakkuus)	E	voltti/metri	V/m
magneettikenttä (magneettivuon tiheys)	B		Vs/m ²
johtavuus	σ (sigma)	siemens/metri	S/m
tiheys	ρ (rho)	1/kuutiometri	m ⁻³
ionituotto	q	m ⁻³ s ⁻¹ (ioniparia)	
(röntgen: 1 R = 258 μ C/kg, 1 μ R/h vastaa 5,48 $\cdot 10^6$ m ⁻³ s ⁻¹)			

Luonnonvakioita

tyhjiön permittiivisyys (eristevakio, dielektrisyysvakio)
 $\epsilon_0 = 8,8544 \cdot 10^{-12}$ C/Vm
 tyhjiön magneettinen permeabiliteetti
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am $\approx 1,2566 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am
 elektronin varauksen itseisarvo (alkeisvaraus)
 $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ C
 valon nopeus tyhjiössä (määritelty tarkaksi arvoksi)
 $c = 299\,792\,458$ m/s $\approx 300\,000$ km/s

Suureet on merkitty tavallisesti *kursiivilla* tai kreikkalaisilla kirjaimilla, yksiköt normaalikirjaimilla.

Kirjallisuutta

Barry, J.D., 1979: Frequency of ball lightning reports. *Journal of Geophysical Research* 84:C1, s. 308-310.

Bent, R.B., & Lyons, W.A., 1984: Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Position and Tracking System) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique. *Preprints, VII International Conference on Atmospheric Electricity, Albany, N.Y., American Meteorological Society*, s. 317-324.

Clary, M., 1985: Lightning! Spectacular & Deadly. *Weatherwise* 38:3, s. 128-135.

Elovaara, J., & Karttunen, M., 1978: Ylijännitteet. *Sähkö* 51:3, s. 86-93.

Fleagle, R.G., & Businger, J.A., 1963: *An Introduction to Atmospheric Physics*. Academic Press. 346 s.

Gardner, R.L., (toim.) 1990: *Lightning Electromagnetics*. Hemisphere Publishing Corporation. 540 s.

Golde, R.H. (toim.), 1977: *Lightning, Vol. I & II*. Academic Press. 849 s. (I osassa salaman perusteiden lisäksi katsaus historiaan. II osa omistettu salamasuojaukselle.)

Golka, R.K., Jr., 1992: Laboratory-produced ball lightning. *9th International Conference on Atmospheric Electricity, 15.-19.6.1992, Pietari*.

Grandt, Ch., 1992: Thunderstorm monitoring in South Africa and Europe by means of very low frequency sferics. *Journal of Geophysical Research* 97:D16, s. 18 215-18 226.

Harjama, E., 1955: Ukkosten luokittelusta. *Kuukausikatsaus Suomen sääoloihin, heinäkuu 1955*, Ilmatieteellinen keskuslaitos, s. 4.

Harjama, E., 1986: "Onko huomenna pouta". Kirjapaino R. Lunkka. 127 s.

Heckman, S.J., & Williams, E.R., 1989: Corona envelopes and lightning currents. *Journal of Geophysical Research* 94:D11, s. 13 287-13 294.

Holopainen, E., & Huovila, S., 1972: *Meteorologia. Ilmakehän fysiikka*. (Lukion erikoiskurssi.) Kirjayhtymä. 55 s.

Holzer, R.E., & Saxon, D.S., 1952: Distribution of electrical conduction currents in

the vicinity of thunderstorms. *Journal of Geophysical Research* 57:2, s. 207-216.

Israel, H., 1970, 1973: *Atmospheric Electricity, Vol. I & II*. Israel Program for Scientific Translations. 796 s. (Ilmasähkön perusteos erityisesti kauniin ilman sähkön osalta.)

Jurenka, H., & Barreto, E., 1985: Electron waves in the electrical breakdown of gases, with application to the dart leader in lightning. *Journal of Geophysical Research* 90:D4, s. 6219-6224.

Klingbeil, R., & Tidman, D.A., 1974: Theory and computer model of the lightning stepped leader. *Journal of Geophysical Research* 79:6, s. 865-869.

Krider, E.P., Nogge, R.C. & Uman, M.A., 1976: A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. *Journal of Applied Meteorology* 15, s. 301-306.

Kuettner, J.P., Levin, Z., & Sartor, J.D., 1981: Thunderstorm electrification — inductive or non-inductive? *Journal of the Atmospheric Sciences* 38:11, s. 2470-2484.

Laitinen, L., 1974: Pohjois-Suomen ukkosista salamanlaskijatulosten valossa. Lapin ilmastokirja, *Acta Lapponica Fenniae* 8, s. 61-64.

Laitinen, L., 1985: Salamanlaskijatoiminta Suomessa vuosina 1961-1980. *Sähkö* 58, s. 18-20.

Magono, Ch., 1980: *Thunderstorms*. Elsevier. 261 s. (Varsin selkeä ja mukava lukea.)

Malan, D.J., 1963: *Physics of Lightning*. The English Universities Press. 176 s.

Matinolli, E., 1980: Ukkosenjohdattimen tulosta Suomeen. *Arkhimedes* 32, s. 106-113.

Nuorteva, M., 1990: Salama puustokuolemien aiheuttajana. *Silva Fennica* 24:2, s. 267-271.

Ohtsuki, Y.H., & Ofuruton, H., 1991: Plasma fireballs formed by microwave interference in air. *Nature* 350, s. 139-141.

Oksanen, K.W., 1940: Ukonilmoista. *Matemaattisten aineiden vuosikirja, syyskuu-joulukuu 1940, 3-4 vihko*, s. 195-203.

Orville, R.E., 1980: Daylight spectra of individual lightning flashes in the 370-690 nm region. *Journal of Applied Meteorology* 19:4, s. 470-473.

Peltonen, T., & Puhakka, T., 1984: *Sääoppi*. Otava. 217 s.

Pirjola, R., & Tuomi, T.J., 1980: Ukkonen sähköilmionä. *Arkhimedes* 32, s. 114-122.

Richard, P., Delannoy, A., Labaune, G., & Laroche, P., 1986: Results of spatial and temporal characterization of the VHF-UHF radiation of lightning. *Journal of Geophysical Research* 91:D1, s. 1248-1260.

- Runnels, L.K., 1966: Ice. *Scientific American*, December 1966, s. 118-126.
- Salanave, L.E., 1980: *Lightning and Its Spectrum*. The University of Arizona Press. 136 p. (Hieno valokuvateos, joka havainnollistaa salaman monia muotoja.)
- SESKO (Suomen Sähköteknillinen Standardisoimisyhdistys), 1983: *Rakennusten ukkossuojaus*. Käsikirja 33, Suomen Standardisoimisliitto. 63 s.
- Singer, S., 1971: *The Nature of Ball Lightning*. Plenum Press. 169 s. (Perusteellinen mutta suhteellisen helpolukuinen kirja pallosalamasta.)
- Singer, S., 1991: Great balls of fire. *Nature* 350, s. 108-109.
- Smirnov, B.M., 1987: The properties and nature of ball lightning. *Physics Reports* 152, s. 177-226.
- Tuomi, T.J., 1982: The atmospheric electrode effect over snow. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 44:9, s. 737-745.
- Tuomi, T.J., 1984: Distribution of atmospheric electric current in the global circuit. *Ilmatieteen laitoksen toimituksia* 87. 67 s.
- Tuomi, T.J., 1987: Salamahavainnot 1984-1986. *Geofysikaalisia julkaisuja* 4, Ilmatieteen laitos. 47 s. (Tästä löytyy luettelo aikaisemmista salamanlaskijajulkaisuista.)
- Tuomi, T.J., 1989: Ten year summary 1977-1986 of atmospheric electricity measured at Helsinki-Vantaa Airport, Finland. *Geophysica* 25:1&2, s. 1-20.
- Tuomi, T.J., 1990: On the accuracy and detection efficiency of a lightning location system of four direction finders. *Geophysica* 26:2, s. 1-16.
- Tuomi, T.J., 1992: Salamahavainnot 1992. *Geofysikaalisia julkaisuja* 29, Ilmatieteen laitos. 36 s. (Tästä löytyy luettelo vastaavista julkaisuista vuosilta 1984-1991.)
- Tuomi, T.J., Summanen, T.H., & Pirjola, R., 1991: Lightning observations in Finland and theoretical calculation of the lightning electromagnetic pulse. *Environmental and Space Electromagnetics* (toim. H. Kikuchi), s. 63-73. Springer-Verlag.
- Tuomi, T.J., & Välimaa, S., 1990: Salamanpaikannin korvaa salamanlaskijat. *Sähkö-Tele* 63:12, s. 38-42.
- Ukonilmat Suomessa 1887-1906. Katso liite G.
- Uman, M.A., 1984: *Lightning*. Dover Publications. 298 s. (Selkeä, mutta keskittyy erilaisiin mittaustuloksiin salamasta; ei anna yleiskuvaa ukkosista.)
- Williams, E.R., 1988: The electrification of thunderstorms. *Scientific American*, November 1988, s. 48-65.
- Volland, H. (toim.), 1982: *Handbook of Atmospheric, Vol. I & II*. CRC Press. 377 + 327 s. (Perusteellinen mutta vaikealukuinen käsikirja.)
- Volland, H., 1984: *Atmospheric Electrodynamics*. Springer-Verlag. 205 s. (Selkeä ja miellyttävä, mutta silti melko perusteellinen katsaus sähköilmiöihin sekä alaehtä yläilmakehässä.)

Englantilais-suomalainen sanasto

Air discharge	ilmasalama	Keraunic level	ukkospäiväluku (vuotuinen)
Ambient electric field	vallitseva sähkökenttä	Leader	esisalama (yleensä)
Anvil	alasin	Leak current	vuotovirta
Arc discharge	(valo)kaaripurkaus	Lightning	salama, salamointi
Atmospheric radioukkonen		Lightning arrester	salamansieppaaja
Atmospheric electricity	ilmasähkö	Lightning flash	salama, salamanisku
Ball lightning	pallosalama	Lightning location system	sal.paikannin
Breakdown	purkaus, läpilyönti	Lightning rod	ukkosjohto
Cell	solu	Mature stage	kypsä vaihe
Charging	varautuminen	Mobility	liikkuvuus
Cloud flash	pilvisalama	Multiplicity	kerrannaisuus
Cloud-to-ground flash	maasalama	Overvoltage	ylijännite
Connecting leader	vastasalama	Point discharge	kärkipurkaus
Continuing current	jatkuva virta	Preliminary breakdown	valmist. purkaus
Dart leader	nuolisalama	Protection	suojaus
Detection efficiency	havaintotehokkuus	Radiation field	säteilykenttä
Direction finder	suunnin, suuntimisasema	Recoil streamer	rekyylipurkaus
Discharge	purkaus	Relative humidity	suhteellinen kosteus
Dissipating stage	laantumisvaihe	Resuscitation	elvytys
Earthing	maadoitus	Return stroke	pääsalama
Electrification	sähköistyminen	Ribbon lightning	nauhasalama
Flash counter	salamanlaskija	Rime	huurre
Flash	salama(n isku), leimahdus	Saturation	kyllästyminen
Flickering	välkkyminen	Sferic radioukkonen	
Front thunderstorm	rintamaaukkonen	Shock wave	iskuaalto
Glow discharge	hohtopurkaus	Shower	kuuro(sade)
Graupel	lumirae	Side flash	sivüisku
Ground flash	maasalama	Stepped leader	(askeltava neg.) esisalama
Gush	(sade)ryöppy	Step voltage	askeljännite
Gust	(ukkos)puuska	Streamer	soihdunpurkaus
Hail	rae, jäärae	Strike	(salaman) isku
Haze	auer	Thunder	(ukoksen) jyrinä
Heat lightning	elosalama	Thundercloud	ukkospilvi
Heat thunderstorm	lämpöaukkonen	Thunder day	ukkospäivä
Instability	epävakaus	Thunderstorm	ukonilma
J-streamer	latvapurkaus		

Hakemisto

Hakemistossa on asianimikkeiden lisäksi mainittu myös ne henkilönnimet, jotka esiintyvät tekstissä mutta eivät kirjallisuusluettelossa. Toimitetuissa kirjoissa (esim. Golde, 1977) esiintyviä kirjoittajia ei ole mainittu.

Aallonpituus 30, 88
Aaltoluku 88
Aaltoputki 93
Adiabaattinen 41
Advektio 70
Aerosoli 67, 72-73
Aikaeropaikannus 50
Aikaväli, salamoiden 57
Akku 45
Alasin 12, 16
Alijäähtyminen 18, 21
Alkupurkaus (pivisalaman) 44
Arktinen ilmassa 70
Askeljännite 64
Auer 13, 67
Auringon säteily 11, 66
Avaruusvaraus 72, 78

Beccaria, G.B. 71

Cesium 72
Coriolis-voima 70
Coulomb, C.A. 72
Cumulonimbus 12

De Saussure, H.B. 72
Dipoli 16, 22, 24
-malli 24, 75
-momentti 90
Dissosiaatio 13

Dynamiikka (ilmakehän) 66, 68

Elektrodiefekti 74
Elinaika 13, 45, 55, 95
Elmon tuli 87
Elosalama 14, 42
Elster, J. 72
Elvytys 62
Energia 29, 45
Ennustaminen 15
Ensiapu 62
Epäitsenäinen purkaus 84
Epävakaus 11, 42, 70
Erottuminen, sähköön 21, 80
Esiintyminen (ukkos) 46, 53
Esisalama 26, 28-29, 31, 43-44, 59, 85-86, 90

Faradayn häkki 64
Fourier-sarja 88
Franklin, B. 71

Gammasäteily 72
Geitel, H. 72
Generaattori 71-72
Globaalinen sähkövirta 58, 79

Hakupurkaus 85
Hankaussähkö 71
Happi 22, 30, 66, 72
Hartsisähkö 71
Havainnointi 46, 94
Havaintosäde 42, 46, 48, 93, 96
Havaintotehokkuus 50, 53, 96, 102
Helminauhasalama 28
Hengityspysähdys 62

Hepoasteet 69
Hiekkamyrsky 14
Hiostavuus 12, 15
Hohtopurkaus 85
Huippuvirta 41
Huiskupurkaus 30
Huurtuminen 18, 21
Hybridisalama 28
Hydroksyyli 23
Härmistyminen 68

Ilmakehä 66
Ilmamassa 70
Ilmamassaukkonen 12, 68, 102
Ilmanpaine 42, 68
Ilmasalama 30, 32
Ilmastohäiriö 92
Ilmasähkö 71
Ilmavirta(us) 20, 68, 102
Induktanssi 88-89
Induktio (sähköstaattinen) 24, 78, 81
-törmäys 22, 81
Induktio (sähkömagneettinen) 61, 90
-kenttä 90
Infrapuna 30
Interferometria 49, 93
Inversio (lämpötila-) 67
Ioni 23, 72-73
Ionisaatio 72, 84
Ionituotto 72-73
Ionosfääri 66, 76, 79, 93
-heijastus 93
Ionosfäärin potentiaali 79
Isku (salaman) 28, 59-65, 108-113
-kohta 28, 31, 48, 57, 59-65
Iskuaalto 42, 86
Itsenäinen purkaus 84
Itätuuli 70

Jatkuva virta 28, 44
J-purkaus 26
Jurva, R. 108
Jyrinä 41, 51
Jännite 24, 45, 62, 73, 88
Jääkide 12, 18, 21, 23, 68

Kalevala 9, 94
Kalevantuli 14, 42
Kalium 72

Kapasitanssi 88-89
Karsten, H. 108
Karttaruutu 96
Kerrannaisuus 27, 29, 41
Kipinä 32, 71
Kohoutuma (masto) 74
Kolumnaarivastus 79
Konvektio 11, 13, 66
-solu 11, 16, 80, 83
Koronakanava 85
Koronapurkaus 85, 87
Kosminen säteily 72, 75
Kumpupilvi 11, 18
Kuulohavainto 46, 51
Kuuropilvi 11-12
Kyllästynyt vesihöyry 18, 68
Kylmä pisara 13, 55, 102
Kylmä rintama 14, 70
Kypsä vaihe 18
Kärkipurkaus 25, 29, 75, 87

Laajeneminen (lämpö-) 41
Laantumisvaihe 19
Lasisähkö 71
Latvapurkaus 27
Leimahdus (välähdys) 15, 30, 42
LeMonnier, L.-G. 71
Lemström, S. 72
Liikkuvuus 73, 75
Linss, W. 72
Lumihiutale 18
Lumikide 16
Lumirae 16, 21, 80, 83
Lämmin rintama 14, 70
Lämmin sektori 12, 70
Lämpötila (salamakanavan) 41
Lämpöukkonen 13
Länsituuli 70
Läpilyönti 24, 82, 84

Maadoitus 60, 63, 65, 73-74
Maapallon ukkoset 57
Maasalama 26, 29, 58
Magneettikenttä 48, 76, 89
Masto 75
Matalapaine 70
Mesopausi 66
Mesosfääri 66

Nauhasalama 28
 Neutraali-tila, -tasapaino 11, 67
 Neutraali-tila 21, 81
 Neutraali-tila 26, 30, 43-45, 72, 86, 90
 Nuolisalama 26, 43-44, 86
 Näköhavainto 46, 51

Ohmin laki 73, 77, 81
 Okluusiorintama 70
 Oksonium 23, 72
 Ominaisvastus 79
 Orografia 13
 Otsoni 66, 94

Paineaalto 42
 Pallosalama 28, 64, 94, 109
 Palovamma 62
 Pasaatituuli 70
 Peilikuvavaraus 74, 77
 Permeabiliteetti 90, 115
 Permittiivisyys 44, 74, 81, 115
 Peräkkäiset salamat 57
 Pienioni 72
 Pilottipurkaus 85
 Pilvipisara 16
 Pilvisalama 30, 44-45, 58, 92
 Pinta-aalto 93
 Pisaraukko 13
 Polaarinen ilmassa 70
 Polarisaatio (sähköstaattinen) 85
 Potentiaali 24, 74, 77, 79
 Pulssi(muoto) 48, 90
 Purkaus 24, 26, 84
 -kanava 26, 84
 -kynnys (läpilyönti-) 24, 75, 82-84
 -säie 26
 Puuskarintama 20
 Pääsalama 26, 44, 86-87, 90, 93
 -malli 87
 Pöly 67
 Pölymyrsky 14

Radioaktiivisuus 72
 Radioukko 47, 92
 Radon 72
 Rae 18
 Rekyylipurkaus 30, 44
 Resistanssi 79, 88-89
 Resistiivisyys 79

Rintama 68
 Rintamaukko 14, 102

Sade 12, 18
 -ryöpy 19, 85
 Salama 24
 -kanava 26, 28, 30, 41, 84
 negatiivinen 26, 28, 41, 44, 85
 positiivinen 29, 41, 44, 86, 92
 Salamamäärä 45, 53, 96, 102
 Salamanlaskija 46, 51, 53
 Salamanpaikannin 41, 48, 52-53, 93, 96, 102
 Salamansieppaaja 60, 64
 Salamatiheys 51, 53
 Salamatuho 108
 Salamavahinko 59, 108
 Salamointi 19, 45, 55
 Sekasalama 28
 Sekoittumiskorkeus, -kerros 67, 75
 Shokkiaalto 42
 Sivuisku 64
 Soihutpurkaus 26, 29-30, 44, 84
 Solu 11, 13
 Spektri 30
 Staattinen kenttä 90
 Stratopausi 66
 Stratosfääri 66
 Suhteellinen kosteus 68
 Sundell, A.F. 108
 Suojaus 59
 rakennusten 60
 verkkojen 61
 henkilökohtainen 62
 Suuntiminen 48, 93
 Sydänpysähdys 62
 Sykloni 70
 Sähköisku 62
 Sähköistyminen 18, 20
 Sähkökenttä 24, 29, 41, 48, 60, 72-74, 77, 81, 84, 89-90
 Sähkömagneettinen kenttä 48, 87, 89-90
 Sähkömäärä 44-45
 Sähkönjohtavuus 44, 72-73, 75-79, 81, 88
 Sähkövirta 44-45, 73, 83, 87
 Säteilyskenttä 90
 Sätilä 15, 69

Taajuus (radio-) 92

Taivutuminen (ääni-aallon) 42
 Talviukko 14
 Teho 30, 45
 Terminen kerros 66, 68
 Termosähköinen ilmiö 23
 Thomson, J.J. 72
 Tiivistyminen 16
 Tiivistymiskorkeus 12, 68
 Torium 72
 Tripoli 16
 Trooppinen ilmassa 70
 Tropopausi 11, 66
 Troposfääri 11, 66, 69
 Tshernobyl 72
 Tulivuorenpurkaus 14
 Typpi 30, 66, 72

Ukkosaktiivisuus 46, 57
 Ukkosalue 11, 55
 Ukkosjakso 55, 102
 Ukkosjohto 60, 74
 Ukkospilvi 12, 16, 24, 75
 Ukkospuuska 20
 Ukkospäivä(luku) 46, 51, 96
 Ukkossolu 11, 80
 Ulosäteily 67
 Ultravioletti 30, 66
 Uraani 72

Vallitseva sähkökenttä 74, 84, 87
 Valmisteleva purkaus 26, 85
 Valo 30
 Valokaaripurkaus (kaaripurkaus) 85
 Valon nopeus 115
 Varaus 16, 43-45, 72-74, 76-79, 81, 83, 88-89
 alkeis- 115
 avaruus- 72, 78
 elektronin 115
 -keskus 16, 24, 29, 44, 78, 80
 Varautuminen 20, 44, 80
 Vastasalama 26, 60
 Vesi 22, 72
 Vety 22
 -sidot 22
 Vesipisara 16, 21
 Viivasalama 28
 Wilson, C. 72
 Virrantiheys 73, 77, 80-81
 Virtapiiri 71, 79

Virvatuli 87
 Voimakas ukonilma 55, 102
 Voimakkuus (salaman) 29, 41
 Vuotovirta 45, 76, 83
 Välikyminen 27
 Väri 30, 94
 Värähdysmoodi 88

Ydinräjähdys 14
 Yleinen kiertoliike 69
 Ylijännite 61-63

Ääni 41-42

Öhquist, W. 108

Kirjoittaja

Tapio J. Tuomi (s. 1945) tuli Ilmatieteen laitokselle 1973. Hän tutki aluksi valon sirontaa ilmakehän hiukkasista ja siirtyi sitten ilmasähkötutkimuksiin. Tällä hetkellä Tuomen tittelinä on ylimeteorologi ja hän tekee tutkimustyötä salamoista. Tuomi väitteli 1984 filosofian tohtoriksi teoreettisessa fysiikassa.

Tähtitieteellinen yhdistys Ursa

Ursa on valtakunnallinen tähtitieteen harrastajien yhdistys, jonka kotipaikka on Helsinki. Se perustettiin 1921 ja nykyään siinä on noin 5900 jäsentä. Ursaan voivat liittyä kaikki tähtitieteestä kiinnostuneet. Jäsenet saavat kuudesti vuodessa ilmestyvän *Tähdet ja Avaruus* -lehden.

Ursalla on Helsingin Kaivopuistossa tähtitorni, jossa järjestetään tähti- ja aurinkonäytöksiä (puh. 90-653505). Ursan kirjastossa on laajan kirjakokoelman lisäksi runsaasti mm. diasarjoja, ääninauhoja ja videoita. Kirjasto on avoinna maanantaisin ja torstaisin klo 18-20 (puh. 90-174048). Lainata voi myös postitse.

Ursa järjestää esitelmätilaisuuksia, kursseja, tähtikerhoja, jäseniltoja, tähtileirejä ja yleisötilaisuuksia. Ursassa on monia harrastusjaostoja aktiivisempia harrastajia varten. Harrastusjaostojen toiminnasta kertoo kuusi kertaa vuodessa ilmestyvä *Ursa Minor* -lehti. Ursalla on elektroninen postilaatikko (puh. 90-174341), jossa on alan tuoreimmat uutiset, lukuisia tietokoneohjelmia ja tekstitiedostoja ja jossa voi käydä alasta keskustelua.

Ursa toimii monella tavalla luonnontieteellisen tiedon levittäjänä. Ursan siirrettävissä planetaarioissa järjestetään tilauksesta maailmankaikkeusoppitunteja. Ursa kustantaa alansa tietokirjallisuutta ja muuta materiaalia. Pyydä ilmainen esite saatavilla olevista julkaisuista!

Ursan jäsenmaksu on vuonna 1993 aikuisilta 110 mk ja alle 18-vuotiailta 85 mk sekä perhejäseniltä 30 mk.

Suomessa on myös runsaasti paikallisia tähtiyhdistyksiä, joista useimmilla on tähtitorni.

Jos tähtimaailma kiinnostaa, ota yhteyttä!

Tähtitieteellinen yhdistys Ursa
Laivanvarustajankatu 9 C, 00140 Helsinki
Puh. 90-174048, faksi 90-657728

Ursan uutuuksia 1991

JÄÄKAUSIEN JÄLJILLÄ

Matti Eronen

Huikkea kertomus maapallon ja elämän kehityksestä jään puristuksessa. Jäätiköt muuttavat merenpinnan korkeutta ja muokkaavat maankuorta. Elämän eteneminen voi jääkausiensa takia siirtyä kokonaan uusiin uo-miin. Kirja on tärkeä puheenvuoro maapallon tämänhetkisiin ympäristöongelmiin. Dosentti Matti Eronen sai 1991 tästä kirjasta valtion tiedonjulkistamispalkinnon. Kirja valittiin myös "vuoden tiedekirjaksi". Sidottu, neliväri-ilite, 272 sivua, hinta 160 mk, ursalaisille 136 mk. Hintoihin lisätään lähetyskulut.

PLANEETTA MAA

Juhani Kakkuri

Ihminen muuttaa maapalloa. Mutta ihmisen toiminta on vähäistä verrattuna luonnon omaan muutostyöhön. Vuosimiljardien aikana mannerliikunnat, maanjäristykset, tulivuoret, veden ja tuulen kulutus ovat muovanneet planeettamme pintaa. Tässä kirjassa annetaan perustietoja maapallostamme, sen synnystä ja rakenteesta ja Maata muokkaavista voimista. Kirjoittaja on Geodeettisen laitoksen yllyhtaja ja tunnettu tieteen popularisoija. Sidottu, neliväri-ilite, 184 sivua, hinta 135 mk, ursalaisille 115 mk. Hintoihin lisätään lähetyskulut.

KOSMOS-TIETOKANTA

Tietokoneen käyttäjälle

Kosmos on tähtitieteen viitetietokanta, joka on valmistettu opetushallituksen tuella. Siinä on 285 keskeisintä tähtitieteen hakusanaa, joista annetaan selitykset sekä viitteet keskeiseen kirjallisuuteen. Tekijöinä Seppo Linnaluoto ja Hannu Karttunen. Kosmos toimii IBM PC -yhteensopivissa koneissa kaikenlaisilla näytöillä. Koko runsaat 700 kilotavua. Ohjelman hinta 3,5" levykkeellä ursalaisille 60 mk ja muille 180 mk. (Jo tämän edun vuoksi kannattaa liittyä Ursaan!) Hintoihin lisätään lähetyskulut.

Ursan uutuuksia 1992

RÄJÄHTÄVÄ MAAILMANKAIKKEUS

Malcolm Longair

Suom. Markus Hotakainen. Merkittäviä ajatuksia tähtitieteen keskeisistä kysymyksistä. Ursan uusi tietokirja kertoo tähtien, galaksien, kvasaarien ja koko maailmankaikkeuden kehityksestä. Mukana on uusia tuloksia esim. COBE-tekokuun mittauksista. 160 s., hinta 98 mk, ursalaisille 78 mk. Hintoihin lisätään lähetyskulut.

KVASAAREJA JA MUSTIA AUKKOJA

Mauri Valtonen

Jännittävä uutuuus! Työssään Turun yliopiston tähtitieteen professorina Valtonen on tutkinut nykytähtitieteen jännittävimpiä asioita: galaksien suihkuja, kaukaisia kvasaareja, jättiläismäisiä mustia aukkoja ja maailman syntyä. Vuosien varrella hän on kirjoittanut lukuisia lehtiartikkeleita, joista keskeiset on nyt koottu yhdeksi kirjaksi. Aiheina on lisäksi mm. Kanarian saarten yhteispohjoismainen NOT-kaukoputki ja Halley'n komeetta. Runsas kuvitus täydentää tekstiä. 190 s., hinta 120 mk, ursalaisille 99 mk. Hintoihin lisätään lähetyskulut.

TÄHDET 1993

Toim. Seppo Linnaluoto

Tukeva tietopaketti vuoden 1993 tähtitaivaasta. Ursan suositussa vuosikirjassa on kultakin kuukaudelta oma tähtikarttansa ja tähtitaivaskatsauksensa. Muuna aineistona runsaasti karttoja, taulukoita ja havainto-ohjeita planeetoista, auringosta, kuusta, tähdistä ja tähdenlannoista. Nidottu, 104 sivua, hinta 45 mk, ursalaisille 38 mk. Hintoihin lisätään lähetyskulut.

Tähdet ja Avaruus

Tukevaa, monipuolista tietoa

Tähdet ja Avaruus on kehittynyt värikkääksi ja arvostetuksi tiedelehdeksi. Se tarjoaa tähtitieteen ja avaruustutkimuksen jännittävimmät löydöt, kauneimmat tähtikuvat ja parhaat havaintovihjeet. Kiintoisaa luettavaa niin nojatuolitähtitieteilijälle kuin aktiiviselle taivaan tarkkailijalle.

Säännöllisinä osastoina mm. Tähtitieteen uutisia, Avaruuskatsaus, Syvä taivas, Harrastajan palsta. Lisäksi artikkeleita tähtitieteen keskeisistä aiheista. Kuusi numeroa vuodessa, yhteensä yli 240 A4-kokoista sivua. Joka numerossa myös upeita värikuvia.

Esimerkkejä vuoden 1993 sisällöstä:

- Suomen meteoriittikraatterit
- Stephen Hawking - kosmoksen rajojen jäljillä
- Venuksen pannukakut ja koronat
- Avaruussukkulat
- Mitä tähdistä tiedetään?
- Vaikuttaako Auringon aktiivisuus Suomenkin säähän?

Tähdet ja Avaruus -lehden saavat jäsenetuna kaikki Ursan jäsenet. Jäsenmaksu on vuonna 1993 aikuisilta 110 mk ja alle 18-vuotialta 85 mk. Lehden voi tilata myös erikseen liittymättä jäseneksi. Tilaushinta vuonna 1993 on 120 mk.

**Ukonilmoihin ja salamoihin
liittyy paljon kysymyksiä,
joihin on ollut vaikea
löytää vastausta.
Nyt Ilmatieteen laitoksen
tutkija on koonnut
perustiedot ukkosesta
yksien kansien väliin.
Kirjassa kerrotaan mm.
ukkosen ja salamoiden
synnystä ja yleisyydestä
sekä suojautumisesta.
Mukana on myös
matemaattisempaa aineistoa
ilmakehäharrastajien
purtavaksi.**

55.5

Kannen kuva Pekka Parviainen

Typografia Arja Latvala

ISBN 951-9269-65-7



9 789519 269658