

**Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ  
υπο-ιονοσφαιρικών διαταραχών VLF τύπου *Early*  
και *Sprites***

**Νινώ Αμβροσιάδη**

**Υπεύθυνος καθηγητής: Χρήστος Χαλδούπης**



**Τμήμα Φυσικής  
Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Ηράκλειο, Φεβρουάριος 2009**

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια καταβάλλεται μια συλλογική προσπάθεια από επιστημονικές ομάδες στην Ευρώπη για την μελέτη των ιονοσφαιρικών φαινομένων που αναφέρονται ως ‘οπτικά μεταβατικά συμβάντα’ (Transient Luminous Events = TLEs), και κυρίως των *sprites* και *elves*. Για αυτό το σκοπό έχουν συσταθεί οι ερευνητικές καμπάνιες *EuroSprite*, οι οποίες από το Καλοκαίρι του έτους 2000 χρησιμοποιούν οπτικά συστήματα για την ανίχνευση των *sprites* κυρίως πάνω από την Ευρώπη. Το Πανεπιστήμιο Κρήτης συνέβαλε σε αυτές τις καμπάνιες προσφέροντας μετρήσεις VLF (Very Low Frequency), οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τον στενής ζώνης (narrow band) δέκτη, ο οποίος διατέθηκε από το Πανεπιστήμιο του Stanford και είναι εγκαταστημένος στο τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης.

Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες που διεξάχθηκαν στα πλαίσια της καμπάνιας *EuroSprite* 2003 και 2007, υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των υπο – ιονοσφαιρικών διαταραχών τύπου ‘early’ και των *sprites* για το 90% των περιπτώσεων, γεγονός που υποδεικνύει μια σχέση αιτίου – αποτελέσματος. Η εργασία αυτή έρχεται ως συνέχεια της παραπάνω έρευνας και βασίζεται στην ανάλυση των οπτικών παρατηρήσεων της καμπάνιας *EuroSprite* 2007 σε συνδυασμό με την ανάλυση των μετρήσεων VLF, με σκοπό να διερευνηθούν οι επιδράσεις των TLEs στην αγωγιμότητα της κατώτερης ιονόσφαιρας (περιοχή D).

Για τον σκοπό της εργασίας συγκεντρώθηκαν: οπτικές παρατηρήσεις από το παρατηρητήριο στο Pic du Midi στα Πυρηναία Όρη της Γαλλίας, μετρήσεις VLF από τον δέκτη της Κρήτης, και μετρήσεις του METEORAGE (Γαλλικό εθνικό σύστημα ανίχνευσης κεραυνών). Η ανάλυση των χρονοσειρών VLF έγινε στην περιοχή του χρόνου με την χρήση του λογισμικού HAIL, το οποίο διατέθηκε από το Πανεπιστήμιο του Stanford, και στην περιοχή των συχνοτήτων με την χρήση των wavelets.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας, κατά την διάρκεια των δύο από τις τέσσερις καταιγίδες που εξετάστηκαν, όλα τα *sprites* συνοδεύονται από διαταραχές τύπου early, ενώ κανένα από τα *sprites* που έλαβαν χώρα στις άλλες δύο καταιγίδες δεν φάνηκαν να προκαλούν τις διαταραχές αυτές. Το συμπέρασμα είναι ότι χρειάζεται να εξεταστεί μεγαλύτερος όγκος δεδομένων ώστε να γίνει πιο ξεκάθαρη η παραπάνω σχέση, και

να κατανοηθούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά των μεταβατικών οπτικών συμβάντων, καθώς και οι επιδράσεις τους στην κατώτερη ιονόσφαιρα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κύριο Χρήστο Χαλδούπη για την διαρκή υποστήριξη και ανεξάντλητη υπομονή που έδειξε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης, ευχαριστώ την Dr. Άgnes Míka για την πολύτιμη καθοδήγησή της στο προγραμματιστικό μέρος της εργασίας.

# Περιεχόμενα

<b>Πρόλογος.....</b>	<b>4</b>
<b>Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγικά στοιχεία.....</b>	<b>7</b>
1.1 Τύποι μεταβατικών οπτικών συμβάντων.....	7
1.2 Στοιχεία ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού.....	9
1.3 Στοιχεία ιονόσφαιρας.....	12
<b>Κεφάλαιο 2: Θεωρητικά στοιχεία.....</b>	<b>17</b>
2.1 Μηχανισμός δημιουργίας των sprites .....	17
2.2 Διπολική ροπή (charge moment) .....	25
2.3 Στοιχεία διάδοσης ΗΜ ακτινοβολίας VLF .....	26
2.4 Σκέδαση των VLF κυμάτων από ιονοσφαιρικές διαταραχές.....	29
2.5 Διαταραχές VLF και sprites.....	32
<b>Κεφάλαιο 3: Ανάλυση και αποτελέσματα.....</b>	<b>34</b>
3.1 Πειραματικά συστήματα.....	36
3.2 Ανάλυση χρονοσειρών VLF.....	38
3.3 Φασματική ανάλυση χρονοσειρών με wavelets.....	50
<b>Κεφάλαιο 4: Συζήτηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα .....</b>	<b>61</b>
4.1 Συσχέτιση των sprites και των διαταραχών τύπου early στις τέσσερις καταιγίδες ....	61
4.2 Διαφορές της ηλεκτρικής δραστηριότητας των τεσσάρων καταιγίδων.....	63
4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης φασματογραφημάτων και συμπεράσματα.....	64
<b>Παράρτημα Α: Εικόνες των TLEs.....</b>	<b>67</b>
<b>Παράρτημα Β: Υπολογισμός της γεωγραφικής θέσης των σημείων     των ζεύξεων GCPs.....</b>	<b>68</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>70</b>

# Πρόλογος

Το ιονοσφαιρικό στρώμα D (D layer) το οποίο εκτείνεται από 50 μέχρι 90 km είναι η κατώτερη ιονοσφαιρική περιοχή η οποία εμπεριέχει το πλέον ασθενώς ιονισμένο πλάσμα στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Π.χ., η ηλεκτρονική πυκνότητα (ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου) παίρνει τιμές που μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της νύχτας από 0.1 – 1000 ηλεκτρόνια ανά  $\text{cm}^{-3}$  από τα 60 μέχρι τα 90 km. Η περιοχή D βρίθκει φυσικο-χημικών φαινομένων τα οποία όμως είναι δύσκολο να μελετηθούν πειραματικά αφού τα ραδιοκύματα, που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται για την μελέτη της ιονόσφαιρας, απορροφώνται έντονα στην περιοχή αυτή κατά την διάρκεια της ημέρας. Κατά την διάρκεια της νύχτας, τα HM κύματα που ανακλώνται από την περιοχή D, και τα οποία μπορούν να δώσουν κάποια πληροφορία για την κατάσταση του ασθενούς ιονοσφαιρικού πλάσματος εκεί, είναι οι υπερ-χαμηλές συχνότητες (VLF= very low frequencies) από 3 μέχρι 30 kHz. Τα HM κύματα VLF χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη μελέτη για την διερεύνηση των συνεπειών που υφίστανται η περιοχή D κατά την διάρκεια μεταβατικών οπτικών συμβάντων, και κυρίως της πλέον συνήθους κατηγορίας αυτών, γνωστών ως *sprites*, που λαμβάνουν χώρα πάνω από ισχυρές κεραυνοκαταιγίδες.

Στις 5 Ιουλίου του 1989, κατά την διάρκεια βαθμονόμησης μιας οπτικής κάμερας ευαίσθητης σε φωτισμό χαμηλής έντασης στο O'Brien Observatory των ΗΠΑ, οι ερευνητές του Πανεπιστημίου της Minnesota κατέγραψαν τυχαία δύο ταυτόχρονες λάμπσεις διάρκειας ~30 ms που εκτεινόταν στην ανώτερη ατμόσφαιρα πάνω από μια μακρινή τροποσφαιρική καταιγίδα, οι οποίες οδήγησαν στην γέννηση ενός νέου ερευνητικού πεδίου. Οι εκλάμπσεις αυτές, που αργότερα ονομάστηκαν *sprites*, ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των οπτικών μεταβατικών φαινομένων (Transient Luminous Events) τα οποία λαμβάνουν χώρα στην ανώτερη ατμόσφαιρα πάνω από κεραυνούς. Οι τύποι των TLE (που περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο) διαφέρουν στα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά, στον μηχανισμό δημιουργίας τους, το ύψος εμφάνισής τους καθώς και στο χρόνο ζωής τους. Οι παρατηρήσεις των φαινομένων αυτών πραγματοποιούνται από το έδαφος με ειδικές video-

κάμερες ευαίσθητες στον φωτισμό χαμηλής έντασης και με πολύ μικρό χρόνο έκθεσης (<20ms), αλλά και από οπτικές και φωτομετρικές παρατηρήσεις από δορυφόρους.

Τα sprites, που αποτελούν το σύνθετο αποτέλεσμα παροδικών ηλεκτρικών εκκενώσεων και οπτικών εκπομπών στην ανώτερη ατμόσφαιρα, μπορεί να προκαλέσουν απότομες διαταραχές του ιονοσφαιρικού μέσου (της περιοχής D) οι οποίες είναι δυνατόν να επηρεάσουν την διάδοση των κυμάτων VLF. Αυτό οφείλεται κατά βάση στην μεταβολή της αγωγιμότητας του μέσου που οδηγεί σε διαταραχές του δείκτη διάθλασης, με αποτέλεσμα η διάδοση των κυμάτων VLF να επηρεάζονται μέσω μηχανισμών ανάκλασης, διάθλασης, περίθλασης και απορρόφησης που οδηγούν στην σκέδαση των κυμάτων σε διαφορετικές από την προσπίπτουσα κατευθύνσεις. Τα κύματα VLF που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της κατώτερης ιονόσφαιρας παράγονται από ισχυρούς στρατιωτικούς πομπούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν κεραιές μήκους εκατοντάδων μέτρων για σκοπούς επικοινωνίας πέραν του ορίζοντα, κυρίως με υποβρύχια, καθώς τα διαδιδόμενα κύματα φτάνουν σε αποστάσεις της τάξης μεγέθους Mm γύρω από την Γη μέσω του κυματοδηγού Γης – Ιονόσφαιρας, με μικρές ενεργειακές απώλειες (π.χ., βλέπε Rodger, 1999, 2003).

Σε περιοχές αυξημένου ιονισμού λόγω εμφάνισης των ηλεκτρικών εκκενώσεων sprites, όπου ο δείκτης διάθλασης είναι διαφορετικός από το περιβάλλον μέσο, η δέσμη των κυμάτων VLF σκεδάζεται με αποτέλεσμα να αλλάξει κατεύθυνση διάδοσης, πλάτος και φάση. Το σήμα που λαμβάνει ένας δέκτης VLF είναι αποτέλεσμα υπέρθεσης του σκεδαζόμενου κύματος και αυτού που δεν επηρεάζεται από την διαταραχή και ακολουθεί τη συντομότερη διαδρομή στον κυματοδηγό γης-ιονόσφαιρας μεταξύ πομπού και δέκτη, γνωστού ως Great Circle Path. Στην περίπτωση αυτή το σήμα στην έξοδο του δέκτη εμφανίζει μια απότομη διαταραχή που περιγράφεται από τον όρο *early*, εντοπίστηκε δε πρώτη φορά από τον Armstrong το 1983 (π.χ. Rodger, 2003; Mika, 2007). Οι διαταραχές αυτές στα VLF εμφανίζονται συνήθως αμέσως μετά από ένα κεραυνό νέφους-εδάφους που δημιουργεί εκκενώσεις sprite, και χαρακτηρίζονται από ένα πολύ μικρό χρόνο καθυστέρησης των προς την ηλεκτρική εκκένωση στην οποία οφείλονται (~20 ms, *early*). Η επαναφορά του σήματος στα αρχικά επίπεδα (*recovery*) παρουσιάζει συνήθως εκθετική μορφή και κυμαίνεται περίπου από 10 μέχρι 200 δευτερόλεπτα, καθορίζεται δε μέσω συνθέτων χημικών διεργασιών επανασύνδεσης των παραγόμενων ηλεκτρονίων με διάφορους τύπους ιόντων. Η μέτρηση του χρόνου επαναφοράς του συμβάντος *early* είναι συνήθως αβέβαιη καθώς το

σήμα ενδέχεται να υφίσταται μεταβολές λόγω ανεξαρτήτων αιτιών που λαμβάνουν μέρος ταυτόχρονα σε άλλες περιοχές του δρόμου διάδοσής του. Ο μικρός χρόνος καθυστέρησης των διαταραχών early ως προς τον διεγείροντα κεραυνό νέφους-εδάφους υποδεικνύει ότι η ηλεκτρική εκκένωση στη τροπόσφαιρα έχει άμεση ηλεκτροστατική είτε ηλεκτρομαγνητική επίδραση με την κατώτερη ιονόσφαιρα, σε αντίθεση με έμμεσες μορφές αλληλεπίδρασης που ανήκουν στην κατηγορία LEP (lightning induced electron precipitation, π.χ. βλέπε Rodger, 2003). Τα μέχρι τώρα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η εμφάνιση των συμβάντων early στα VLF σχετίζεται στενά με τα sprites και elves (π.χ. Haldoupis et al., 2004; Mika, 2007), αλλά η σχέση αυτή δεν είναι πάντα ξεκάθαρη είτε υπαρκτή.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια να διερευνηθεί περαιτέρω η σχέση μεταξύ των sprites και των διαταραχών τύπου early, με σκοπό την θεμελίωση της ακριβούς φύσης της σχέσης μεταξύ των δύο φαινομένων. Για την πειραματική μελέτη της εν λόγω σχέσης πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις, όπως π.χ., μεταξύ άλλων, η μορφή του sprite και η θέση του σε σχέση με το GCP πομπού-δέκτη όπως και το ύψος στο οποίο εμφανίζεται. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, υπάρχει ανάγκη προσεκτικής ανάλυσης μεγαλύτερου όγκου μετρήσεων για την συναγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, κάτι το οποίο επιχειρείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Όλες οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται εδώ έχουν συλλεχθεί στα πλαίσια των οργανωμένων παρατηρήσεων *EuroSprite* (Neubert et al., 2007), κατά την διάρκεια του καλοκαιριού του έτους 2007. Η ανάλυση των μετρήσεων VLF έγινε στην περιοχή χρόνου και συχνότητας (time and frequency domain), με την χρήση του λογισμικού HAIL που παραχωρήθηκε από το Stanford όπως και μέσω ειδικού λογισμικού φασματικών τεχνικών με wavelets. Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση του πειράματος και των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, παραθέτουμε βασικά εισαγωγικά στοιχεία, όπως και θεωρητικές γνώσεις επί των φαινομένων των sprites και της διάδοσης των κυμάτων VLF στον κυματοδηγό Γης – ιονόσφαιρας..

Μέρος αυτής της εργασίας παρουσιάστηκε στο Διεθνές Συμπόσια Ισημερινής Αερονομίας ISEA12 (International Symposium of Equatorial Aeronomy) σε μορφή poster. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να επισκεφτεί την ιστοσελίδα: <http://isea12.physics.uoc.gr> για περισσότερες πληροφορίες.

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά Στοιχεία

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη των μεταβατικών οπτικών συμβάντων και γίνεται μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών τους. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στον ατμοσφαιρικό ηλεκτρισμό, και τέλος παρουσιάζονται συνοπτικά η δομή και τα χαρακτηριστικά της ιονόσφαιρας.

## 1.1 Τύποι Μεταβατικών Οπτικών Συμβάντων (TLE)

Οι κατηγορίες των μεταβατικών οπτικών φαινομένων (TLE) που έχουν παρατηρηθεί στη ανώτερη ατμόσφαιρα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 και εξηγούνται στο κείμενο που ακολουθεί. Στην εικόνα αυτή επίσης φαίνονται οι μέσες κατακόρυφες μεταβολές της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα, όπως και της ηλεκτρονικής πυκνότητας της κατώτερης ιονόσφαιρας μέχρι τα 100 km. Η περιοχή της ιονόσφαιρας από 50 -90 km, ονομάζεται περιοχή D.

Sprites: Είναι φωτεινοί σχηματισμοί (ηλεκτρικές εκκενώσεις στην ανώτερη ατμόσφαιρα) των οποίων η πιθανότητα δημιουργίας, η δομή και το μέγεθος εξαρτώνται άμεσα από τα χαρακτηριστικά ενός θετικού κεραυνού νέφους-εδάφους (+CG) που τα δημιουργεί και από την κατανομή του φορτίου στο νέφος. Συνήθως εμφανίζονται στα ύψη από 40 -90 km, ενώ αρκετά από αυτά φαίνεται να δημιουργούνται πρώτα περί τα 70 km και στη συνέχεια να εκτείνονται ταχύτατα προς τα κάτω και προς τα πάνω με ταχύτητα  $\sim 10^7$  m/s. Η οριζόντιες διαστάσεις τους κυμαίνονται από μερικά μέτρα αν είναι μεμονωμένες κολώνες, μέχρι  $\sim 25 - 50$  km αν ανήκουν σε άλλη κατηγορία, και μπορεί να εμφανιστούν οριζοντίως μετατοπισμένα σε σχέση με τον +CG κεραυνό που τα προκάλεσε. Το χρώμα τους είναι κόκκινο και οφείλεται στην αποδιέγερση μορίων  $N_2$  και εκπομπή στην 1η θετική ζώνη



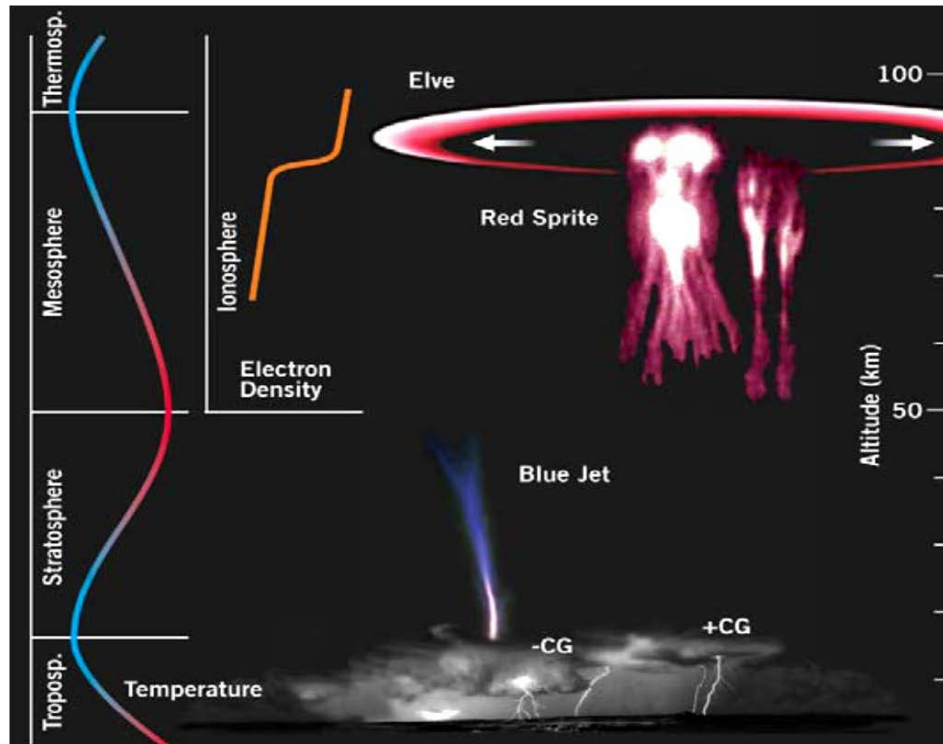
(N<sub>2</sub>(1PG)) στα 600-760 nm. Η διέγερση οφείλεται σε ελεύθερα ηλεκτρόνια που αποσπώνται από αρνητικά ιόντα (ενέργεια απόσπασης: 0.5 – 1.5 eV) και επιταχύνονται στο υπάρχον ηλεκτρικό πεδίο μέχρι την ενέργεια ~7.5 eV. Τα πιο στοιχειώδη και πιθανότατα τα μικρότερα sprites είναι απλές κάθετες κολώνες που ονομάζονται C-sprites. Τα C-sprites χαρακτηρίζονται από μικρό χρόνο καθυστέρησης (<25 ms) μετά το +CG που τα προκαλεί και μικρή ενδονεφική (IC) κεραυνική δραστηριότητα. Μεγάλες συστάδες των C-sprites, των οποίων οι διακλαδώσεις εκτείνονται προς τα κάτω ονομάζονται jellyfish. Μια υποκατηγορία των sprites των οποίων διακλαδώσεις εκτείνονται προς την ιονόσφαιρα ονομάζονται carrots και έχουν την μεγαλύτερη φωτεινότητα από όλα τα είδη. Αυτό το είδος χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο χρόνο καθυστέρησης και έντονη IC δραστηριότητα. (Williams,2001; Mika,2007; Rodger,1999)

Sprite halos: Είναι μια σύντομη και διάχυτη λάμψη που εκτείνεται οριζόντια, βρίσκεται στην επάνω περιοχή D σε υψόμετρο 70 – 85 km, και συνήθως προηγείται του σχηματισμού του sprite. Ποιο ποσοτικά, κατά μέσο όρο τα sprite halos τοποθετούνται περί τα 80 km, έχουν πάχος ~5 km και διάμετρο ~100 km. Η δημιουργία τους οφείλεται στο ημι-ηλεκτροστατικό πεδίο QE (quasi-electrostatic) που μπορεί να δημιουργηθεί αμέσως μετά από μια εκκένωση +CG μεγάλης διπολικής ροπής (αυτό θα εξηγηθεί αργότερα με λεπτομέρεια). (Williams,2001; Mika,2007; Rodger,1999)

Elves: Είναι φωτεινοί σχηματισμοί σχήματος δακτυλιδιού (αν προκαλείται από κεραυνούς CG) και σχήματος δίσκου (αν προκαλείται από IC) που επεκτείνονται οριζόντια φτάνοντας την διάμετρο των 500 km ενώ διαρκούν λιγότερο από 1 ms. Συνήθως σχηματίζονται σε υψόμετρο των 85 – 105 km, ~350 μs μετά από ισχυρή ηλεκτρική εκκένωση σε μεγάλα νέφη στην τροπόσφαιρα. Το χρώμα τους είναι κόκκινο και οφείλεται στην αποδιέγερση μορίων N<sub>2</sub> και εκπομπή στην 1η θετική ζώνη, όπως και στην περίπτωση των sprites. (Williams,2001; Mika,2007; Rodger,1999)

Blue Jets: Είναι Φωτεινοί σχηματισμοί σε σχήμα κώνου (πλάτους ~14<sup>0</sup>), που ξεκινάνε από το πάνω μέρος του νέφους (περί τα 10 km) και εκτείνονται προς τα πάνω μέχρι το υψόμετρο των 40 – 50 km με ταχύτητα ~100 km/s. Η δημιουργία τους συσχετίζεται με ± CG παρουσία

επίσης εκκενώσεων IC, καθώς επίσης και με μεταφορά μεγάλων φορτίων εντός του νέφους αλλά χωρίς τη δημιουργία ηλεκτρικών εκκενώσεων. Το χρώμα τους είναι μπλε και οφείλεται στην αποδιέγερση ιόντων  $N_2^+$  από την πρώτη διεγερμένη στάθμη, ενώ η λαμπρότητά τους είναι της τάξης των 500 kR στη βάση ενώ μειώνεται σταδιακά στα  $\sim 7$  kR στην κορυφή. (Williams,2001; Mika,2007 ,Rodger,1999)



Σχήμα 1: Είδη των TLEs, βαθμίδα θερμοκρασίας και ηλεκτρονικής πυκνότητας

## 1.2 Στοιχεία ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού

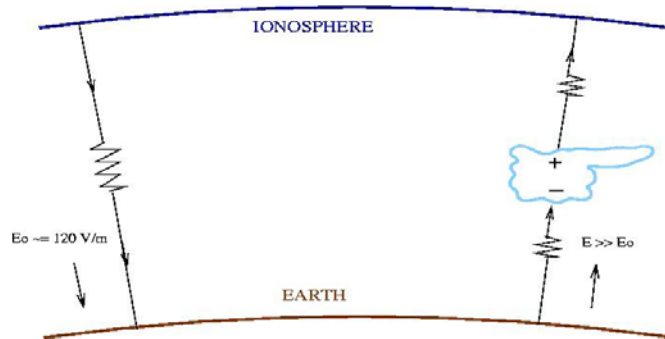
Για να μάθουμε σε ποιες περιοχές και με ποια συχνότητα κατανέμονται τα sprites, είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε την παγκόσμια κατανομή των καταιγίδων. Όπως φαίνεται στο Σχ.3, η μεγαλύτερη ηλεκτρική δραστηριότητα υπάρχει κοντά στον ισημερινό και σε περιοχές πάνω από την στεριά. Αυτό συμβαίνει επειδή: α) ο θερμός αέρας συγκρατεί μεγαλύτερη ποσότητα υδρατμών και έτσι ευνοείται ο σχηματισμός πυκνών νεφώσεων μεγάλης κατακόρυφης έκτασης, β) η πυκνότητα των πυρήνων συμπύκνωσης, όπως για παράδειγμα

μόρια σκόνης και αιωρήματα, είναι αυξημένη πάνω από το έδαφος, γ) οι ορεινοί όγκοι παίζουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία νεφώσεων, ενώ το φορτίο που συσσωρεύεται στις αιχμηρές προεκβολές συμβάλλει στην δημιουργία ηλεκτρικών εκκενώσεων, και δ) η ταχύτητα των ανοδικών ρευμάτων (η οποία κυμαίνεται από 10 m/s πάνω από τους ωκεανούς, μέχρι 50 m/s πάνω από τη στεριά) μέσα στο νέφος παίζει κρίσιμο ρόλο στον διαχωρισμό των φορτίων εντός του νέφους και την δημιουργία διαφορών δυναμικού, έτσι η συχνότητα και η ένταση των κεραυνών πάνω από τη στεριά να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή πάνω από ωκεανούς. Αυτά συμφωνούν και με τις δορυφορικές παρατηρήσεις των sprites, που δείχνουν την μεγαλύτερη δραστηριότητα σε γεωγραφικό πλάτος  $\pm 30^{\circ}$  και κυρίως πάνω από την κεντρική Αφρική (Price, 2006)

Κατά την διάρκεια του εικοσιτετράωρου παρατηρούνται τρία μέγιστα στην εμφάνιση των ηλεκτρικών εκκενώσεων παγκοσμίως, όπως φαίνεται στο Σχ.4. το πρώτο αντιστοιχεί στην Νότιο-Ανατολική Ασία (09 UT), το δεύτερο στην Αφρική (14 UT) και το τρίτο στην Αμερικανική ήπειρο (20 UT). Η γραφική παράσταση της παγκόσμιας ηλεκτρικής δραστηριότητας σαν συνάρτηση του χρόνου UT δίνει ένα ελάχιστο κοντά στη 03 UT (όταν ο Ήλιος βρίσκεται πάνω από τον Ειρηνικό Ωκεανό), και ένα μέγιστο στο 14-19 UT. Σε συνθήκες καλού καιρού το ηλεκτρικό πεδίο κατευθύνεται προς τη Γη, η οποία είναι αρνητικά φορτισμένη, ενώ η μέση τιμή του κοντά στην επιφάνεια της Γης είναι 120 V/m και φθίνει εκθετικά με το υψόμετρο. Αν δεν υπήρχε κάποιος μηχανισμός επαναφόρτισης που να διατηρεί την επιφάνεια της Γης φορτισμένη με κατά μέσο όρο σταθερό φορτίο  $-500.000\text{ C}$ , το πεδίο θα έφθινε και θα εξαφανιζόταν σε  $\sim 30$  λεπτά. Η συνεχής φόρτιση της γης με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο γίνεται μέσω της παγκόσμιας κεραυνικής δραστηριότητας. Αυτό προκύπτει από την παρατήρηση ότι το ηλεκτρικό πεδίο κατά τη διάρκεια της μέρας παρουσιάζει τις ίδιες διακυμάνσεις με την ημερήσια παγκόσμια ηλεκτρική δραστηριότητα (Σχήμα 4).

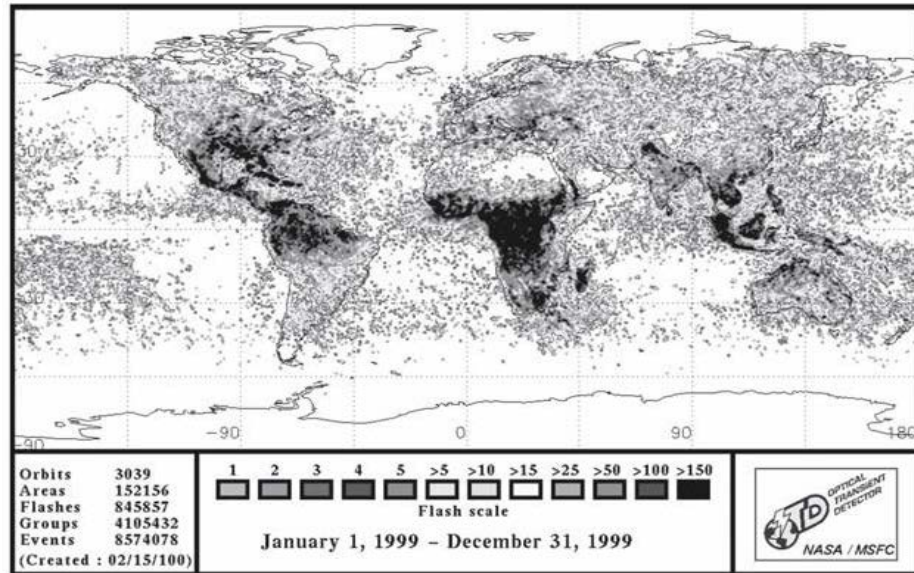
Το σύστημα Γη-ατμόσφαιρα-ιονόσφαιρα συμπεριφέρεται όπως φαίνεται στο Σχ. 2 σαν ένα τεράστιο ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο η γη και η ιονόσφαιρα θεωρούνται ισοδυναμικές επιφάνειες. Το κύκλωμα κλείνει μέσω της ατμόσφαιρας (η οποία έχει κάποια μικρή αλλά μη μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα), ενώ τον ρόλο της μπαταρίας παίζουν τα σύννεφα εντός των οποίων διαχωρίζονται τα φορτία και δημιουργούνται ισχυρές διαφορές δυναμικού. Το κύκλωμα κλείνει μέσω των κεραυνών οι οποίοι ενεργούν στιγμιαία ως

αγώγιμοι δρόμοι (αγωγοί) μεταξύ νεφών και γης. Μέσω των κεραυνών ηλεκτρόνια μεταφέρονται στη γη, όπου ταχύτατα ισοκατανέμονται στην επιφάνειά της (αφού η γη είναι αγωγός) ώστε κατά μέσο όρο το φορτίο της γης να διατηρείται σχεδόν σταθερό. Το κύκλωμα κλείνει στις περιοχές καλού καιρού μέσω της ατμόσφαιρας όπως φαίνεται στο Σχ. 2. Το ρεύμα κοντά στην επιφάνεια της Γης σε περιοχές (συνθήκες) καλού καιρού είναι της τάξης των  $\sim 2 \text{ pA/m}^2$ .

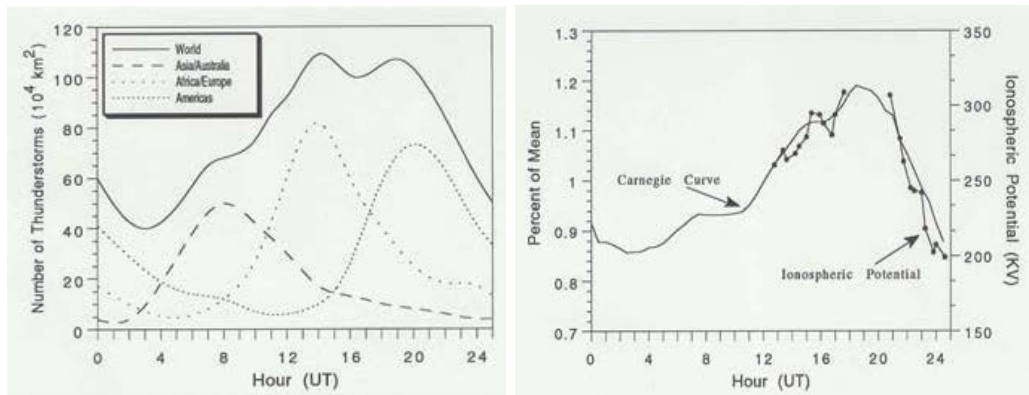


**Σχήμα 2:** Απλοποιημένο Ισοδύναμο παγκόσμιο ηλεκτρικό κύκλωμα

Οι πιο συχνές ηλεκτρικές εκκενώσεις είναι αυτές που λαμβάνουν χώρα μέσα στα νέφη (Intra Cloud). Ο τύπος των εκκενώσεων που μεταφέρουν αρνητικό φορτίο από το νέφος στο έδαφος αναφέρεται ως Negative Cloud to Ground (-CG), και αποτελούν το 90% όλων των CG, ενώ τα +CG που συνήθως σχετίζονται με αμμωνοειδή νέφη και μεταφέρουν αρνητικό φορτίο από το έδαφος στο νέφος αποτελούν το υπόλοιπο 10%.



Σχήμα 3: Παγκόσμια κατανομή κεραυνών



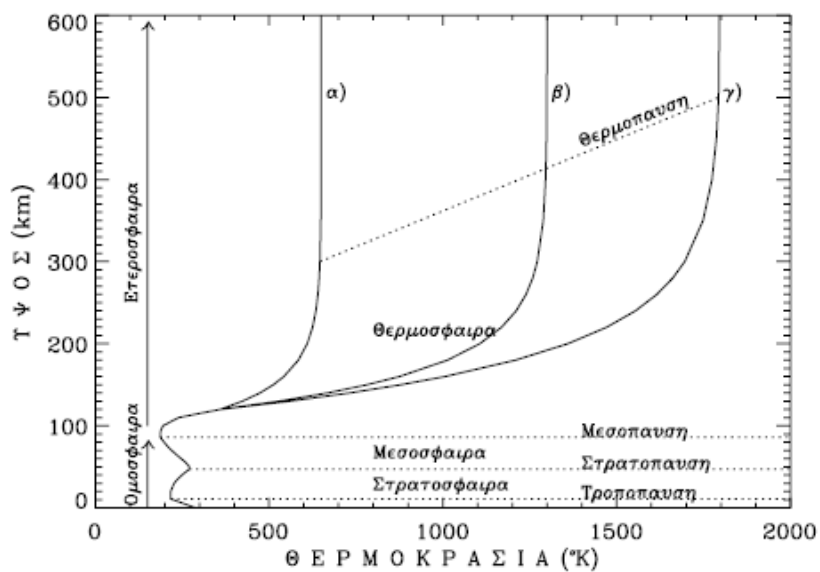
Σχήμα 4: α) Ημερήσια διακύμανση του αριθμού των κεραυνικαταιγίδων σε τρεις διαφορετικές περιοχές, β) ημερήσια διακύμανση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στην ιονόσφαιρα και την επιφάνεια της γης.

### 1.3 Στοιχεία ιονόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα μπορεί να χωριστεί σε περιοχές ή στρώματα (σφαίρες) σύμφωνα με κάποια κριτήρια κατά τα οποία μια φυσική παράμετρος μεταβάλλεται με το ύψος. Ένα από

αυτά είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος ή η κλίση της θερμοβαθμίδας, βλέπε Σχ. 5. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, έχουμε την τροπόσφαιρα, την στρατόσφαιρα, την μεσόσφαιρα και την θερμοσφαιρα.

Επίσης, μπορούμε να χωρίσουμε την ατμόσφαιρα σε ομόσφαιρα και εταιρόσφαιρα. Στην ομόσφαιρα, που φτάνει μέχρι περίπου τα 100km, επικρατεί η μίξη των αερίων μαζών η οποία οφείλεται στην μακροσκοπική κίνηση των μορίων και εξαιτίας της η σύσταση της ατμόσφαιρας δεν αλλάζει με το ύψος. Στην εταιρόσφαιρα, που βρίσκεται πάνω από τα 100km, γίνεται διαχωρισμός λόγω βαρυτικής έλξης και μοριακής διάχυσης. Με αυτόν τον μηχανισμό η συγκέντρωση των ελαφρότερων μορίων φθίνει με μικρότερο ρυθμό συγκριτικά με τα βαρύτερα, και συνεπώς η σύσταση της ατμόσφαιρας αλλάζει, με το μέσο μοριακό βάρος να μειώνεται, με το ύψος.



**Σχήμα 5:** Ατμοσφαιρικές περιοχές σύμφωνα με την μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος

Η περιοχή της ατμόσφαιρας όπου υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα σε ίδιο αριθμό ονομάζεται ιονόσφαιρα. Τα ιόντα στην ατμόσφαιρα δημιουργούνται με την διαδικασία του φωτοϊονισμού μέσω της πρόσπτωσης στα ατμοσφαιρικά συστατικά ηλιακής υπεριώδους και Χ ακτινοβολίας, όπως και δια της κοσμικής (σωματιδιακής) ακτινοβολίας. Η ιονόσφαιρα χωρίζεται σε περιοχές με διαφορετική σύσταση και περιεκτικότητα σε ιόντα, η

οποία καθορίζεται από την ισορροπία των διαδικασιών της παραγωγής ιονισμού και της απώλειά του δια επανασύνδεσης. Το Σχήμα 6 δείχνει την υψομετρική δομή της ιονόσφαιρας, η οποία χαρακτηρίζεται από την ηλεκτρονική πυκνότητα, η οποία ακολουθείται κατά την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, όπως και κατά την περίοδο ηλιακού μεγίστου και ελαχίστου. Οι κύριες ιονοσφαιρικές περιοχές είναι η D, E F, με την τελευταία να διαχωρίζεται στη διάρκεια της ημέρας σε F1 και F2.

Τα ιονοσφαιρικά στρώματα, η πλειοψηφία των ιόντων που συναντάμε εκεί και ο μηχανισμός παραγωγής τους είναι:

Η περιοχή D εκτείνεται από τα ~50 έως τα ~90 km.

κατώτερη D:  $N_2^+$  και  $O_2^+$ , λόγω απορρόφησης κοσμικής ακτινοβολίας

μεσαία D:  $N_2^+$  και  $O_2^+$ , λόγω απορρόφησης ακτίνων X μήκους με  $\lambda < 10 \text{ \AA}$

ανώτερη D:  $NO^+$ , λόγω απορρόφησης της ισχυρής ηλιακής εκπομπής Lyman-a

Η περιοχή E εκτείνεται από τα ~90 έως τα ~150 km

κατώτερη E:  $N_2^+$  και  $O_2^+$ , λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας  $10 < \lambda < 100 \text{ \AA}$

μεσαία E:  $O_2^+$ , λόγω απορρόφησης Lyman-β

ανώτερη E:  $NO^+$  και  $O^+$

Η περιοχή F1 εκτείνεται από τα ~150 km – 200 km

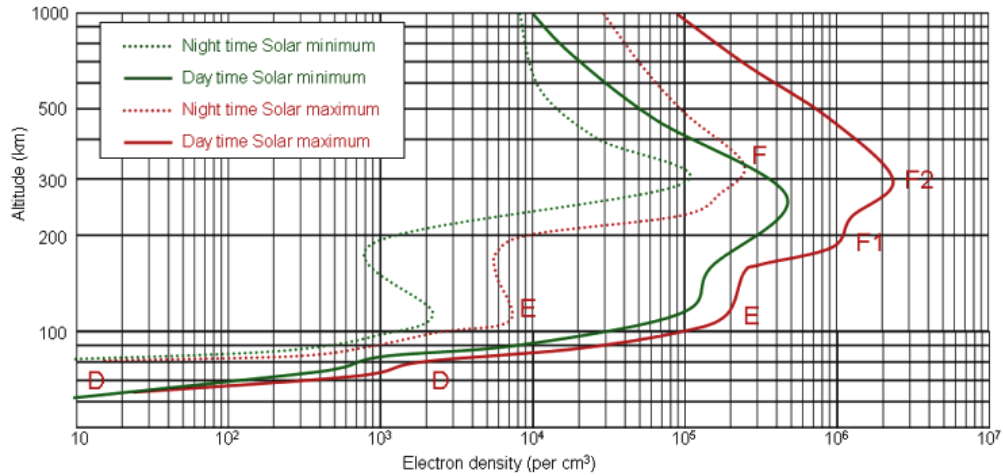
κατώτερη F1:  $O^+$ , λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας με  $\lambda < 910 \text{ \AA}$

ανώτερη F1:  $N_2^+$ , λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας με  $\lambda < 790 \text{ \AA}$

Η περιοχή F2 εκτείνεται από τα 200 μέχρι πάνω από τα 400 km

κυρίως  $O^+$  λόγω απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας με  $\lambda < 910 \text{ \AA}$

Η κορυφική ιονόσφαιρα εκτείνεται πάνω από τα 500 km με κύρια ιόντα  $He^+$  και  $H^+$ .



**Σχήμα 6:** Η ιονόσφαιρα της Γης και η μεταβλητότά της

Η μορφολογία της ιονόσφαιρας παρουσιάζει ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις, και επίσης εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα (π.χ. τις κηλίδες, τις εκλάμψεις και τον ενδεκαετή ηλιακό κύκλο, βλέπε Σχ.6). Βλέπουμε ότι η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων πρακτικά μηδενίζεται κάτω από κάποιο υψόμετρο κοντά στα 20 km κατά την διάρκεια της μέρας. Αυτό οφείλεται στο ότι η ιονίζουσα ακτινοβολία δεν φτάνει μέχρι την κατώτερη ατμόσφαιρα λόγω της απορρόφησής της από τα ανώτερα στρώματα. Ακόμα όμως και όταν δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, παραμένουν ελεύθερα για απειροελάχιστα χρονικά διαστήματα (<1 ms) μέχρι να επανασυνδεθούν με ουδέτερα μόρια ή θετικά ιόντα ή να προσροφηθούν σε άλλα μόρια, εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας στην κατώτερη ατμόσφαιρα

Η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων αλλά και των ιόντων στην ιονόσφαιρα παίζει σημαντικό ρόλο στην διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία υφίσταται μεταβολές λόγω ανάκλασης, διάθλασης, σκέδασης και απορρόφησης. Οι ιονοσφαιρικές διαταραχές των ΗΜ κυμάτων χρησιμοποιούνται για την μελέτη ενός μεγάλου φάσματος φαινομένων του ιονοσφαιρικού πλάσματος. Η ικανότητα της ιονόσφαιρας να αντανακλά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξαρτάται άμεσα από την συχνότητα πλάσματος που ορίζεται ως:

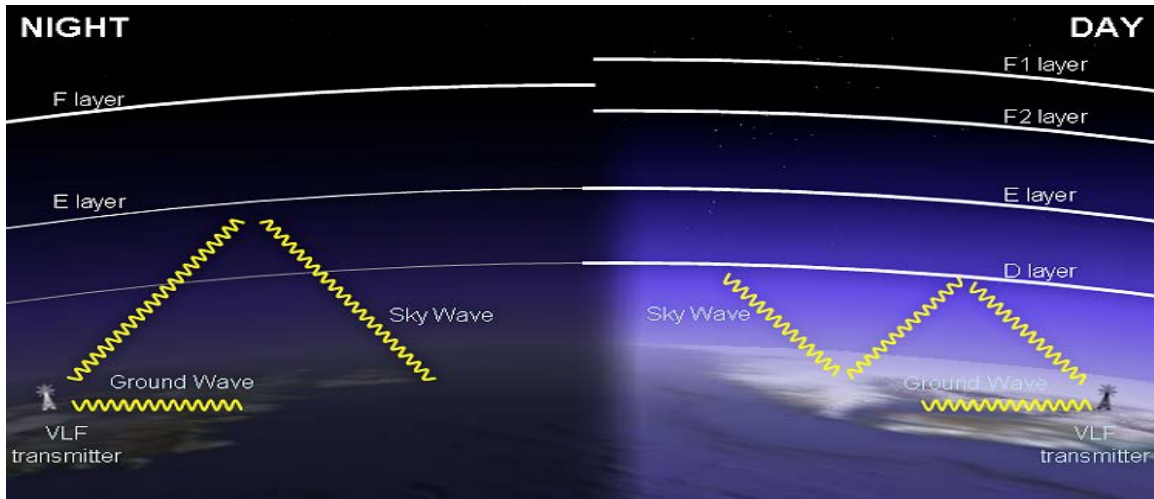
$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (1.1)$$



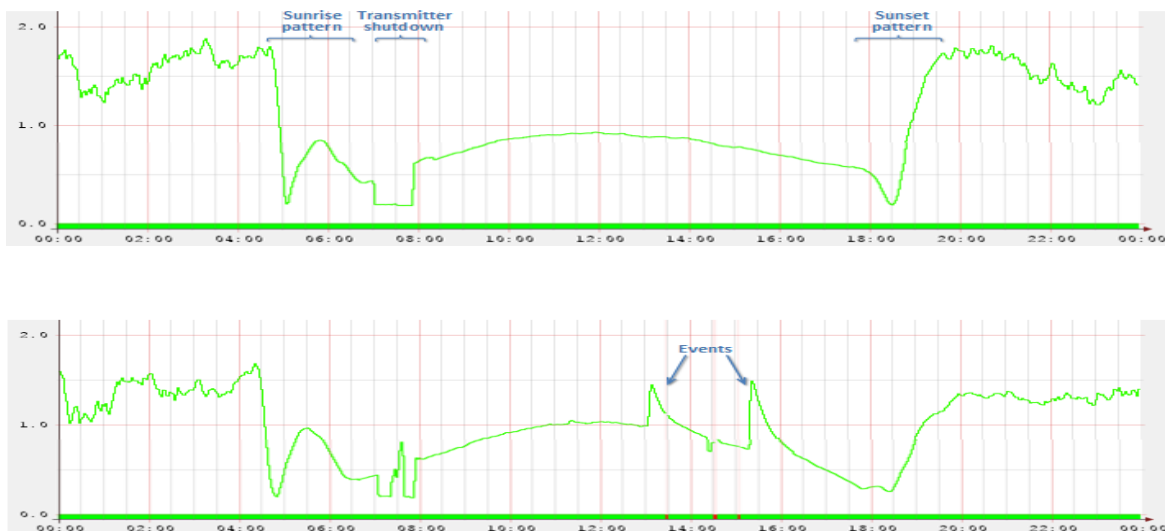
όπου  $e$ ,  $m_e$  το φορτίο και η μάζα του ηλεκτρονίου,  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού και  $N_e$  η πυκνότητα των ηλεκτρονίων. Αν η συχνότητα του κύματος  $\omega$  είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα του πλάσματος, τότε το πλάσμα είναι διαπερατό σε αυτό το κύμα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση λαμβάνει χώρα ανάκλαση.

Η παρούσα μελέτη αφορά HM κύματα VLF με συχνότητες στην περιοχή από 3 – 30 kHz . Αυτά, λόγω της πολύ χαμηλής συχνότητας σε σχέση με την συχνότητα πλάσματος, απορροφούνται και ανακλώνται στα χαμηλά ύψη της περιοχής D κατά τη διάρκεια της μέρας, ενώ τη νύχτα η περιοχή D σχεδόν εξαφανίζεται με αποτέλεσμα η ανάκλασή τους να γίνεται στο κατώτερο όριο της περιοχής E (~85 – 90 km) (βλέπε Σχ. 7). Το σήμα που λαμβάνουμε σε αυτή την περίπτωση συνήθως δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, παρά μόνο όταν υπάρχουν τοπικές, παροδικές διαταραχές σε ύψος μικρότερο του ύψους ανάκλασης.

Για μια ορισμένη ζεύξη VLF, ένας δέκτης λαμβάνει την υπέρθεση του κύματος που ανακλάστηκε από την ιονόσφαιρα και του κύματος που φτάνει απ' ευθείας σε αυτόν από τον πομπό μόνο όταν ο πομπός και δέκτης είναι σε οπτική επαφή, αλλιώς η λήψη είναι αποτέλεσμα πολλαπλών ανακλάσεων διαφορετικών τρόπων (modes) στα αγωγία τοιχώματα του κυματοδηγού Γης-Ιονόσφαιρας. Στο Σχήμα 8 φαίνεται η μεταβολή του σήματος VLF σε ένα δέκτη (που εκπέμπεται από πομπό σε μεγάλη απόσταση από τον δέκτη) στη διάρκεια μιας ήσυχης ημέρας, και μιας ημέρας με έντονη ηλιακή δραστηριότητα. Όπως βλέπουμε, απότομες μεταβολές του σήματος χαρακτηρίζονται ως events (συμβάντα) και μπορεί να οφείλονται σε διαταραχές της ηλεκτρονικής πυκνότητας σε κάποια περιοχή της ιονόσφαιρας που βρίσκεται κοντά στη ζεύξη πομπού – δέκτη. Παρόμοιες μεταβολές μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης με σκοπό την διερεύνηση των φαινομένων που τα παράγουν.



Σχήμα 7: Διάδοση ΗΜ κυμάτων VLF στον κυματοδηγό Γης-Ιονόσφαιρας



Σχήμα 8 : Μεταβολή του σήματος VLF σε έναν ημερήσιο κύκλο

## Κεφάλαιο 2: Θεωρητικά Στοιχεία

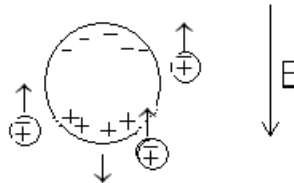
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο μηχανισμός γένεσης των sprites, καθώς και ο ρόλος που παίζει η διπολική ροπή της ηλεκτρικής εκκένωσης CG στην δημιουργία τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται στοιχεία διάδοσης κυμάτων VLF στον κυματοδηγό Γη – ιονόσφαιρα. Επίσης, περιγράφεται ο μηχανισμός σκέδασης των κυμάτων VLF από τοπικές

υπο-ιονοσφαιρικές διαταραχές της ηλεκτρονικής πυκνότητας, και οι αντίστοιχες διαταραχές τύπου *early* που εμφανίζονται στο σήμα VLF.

## 2.1 Μηχανισμός Δημιουργίας των sprites

Πιστεύεται ότι η δημιουργία των sprites οφείλεται στο ημιστατικό ηλεκτρικό (Quasi Electrostatic) πεδίο που δημιουργείται πάνω από ένα νέφος μετά από θετικές ηλεκτρικές εκκενώσεις νέφους – εδάφους (+CG). Παρακάτω αναλύουμε την δημιουργία και τη μορφή του ημιστατικού αυτού πεδίου και τον μηχανισμό δημιουργίας των sprites.

Στα νέφη υπάρχουν ανοδικά και καθοδικά ρεύματα μαζών σταγονιδίων και υδρατμών. Τα μεγαλύτερα σταγονίδια – που είναι πολωμένα εξαιτίας της ύπαρξης του ηλεκτρικού πεδίου της ατμόσφαιρας – κινούνται προς τα κάτω με την επίδραση της βαρύτητας, και συγκρούονται με τις μικρότερες σταγόνες τις οποίες έλκουν και συγκρατούν από αυτές το αρνητικό φορτίο, ενώ οι μικρές σταγόνες ανυψώνονται λόγω των ρευμάτων αέρα (Σχήμα 9).

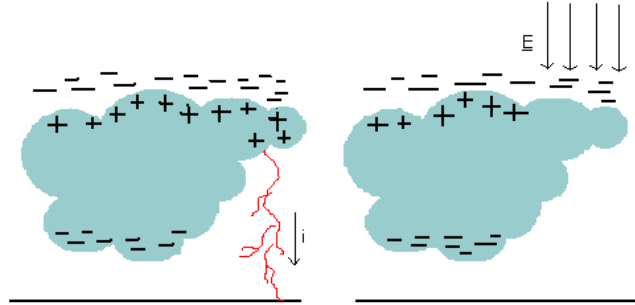


Σχήμα 9: κίνηση πολωμένων σταγονιδίων στα νέφη

Το τελικό αποτέλεσμα σε μια πρώτη προσέγγιση είναι τα κατώτερα στρώματα του νέφους να φορτίζονται αρνητικά, ενώ τα ανώτερα να έχουν περίσσεια θετικού φορτίου. Αυτό το θετικό φορτίο έλκει το ελεύθερο αρνητικό φορτίο που βρίσκεται πάνω από το σύννεφο με αποτέλεσμα το ολικό ηλεκτρικό πεδίο στη ανώτερη ατμόσφαιρα να ουδετεροποιείται.

Κατά την διάρκεια θετικών ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταφέρεται αρνητικό φορτίο από το έδαφος στην πάνω περιοχή ή όριο του νέφους όπου και γίνεται απότομη εξουδετέρωση, με αποτέλεσμα το αντίστοιχο αρνητικό φορτίο που βρίσκεται από πάνω και κοντά σε αυτό να μένει αθωράκιστο και να δημιουργεί ένα πεδίο QE στην ανώτερη

ατμόσφαιρα η τιμή του οποίου μπορεί να φτάσει τις μερικές εκατοντάδες V/m στο υψόμετρο των 60 km (Pasko et al., 1997). Η μορφή αυτού του πεδίου μεταβάλλεται με το ύψος, αλλά και με τον χρόνο. Ο παραπάνω μηχανισμός σχηματοποιείται στην επόμενη εικόνα (10):



Σχήμα 10: σχηματισμός ημι-ηλεκτροστατικού πεδίου (QE field)

Υπό την επίδραση του πεδίου QE επέρχεται ηλεκτρική κατάρρευση εφόσον αυτό υπερβαίνει το πεδίο ηλεκτρικής κατάρρευσης  $E_k$  του αέρα. Στην περίπτωση αυτή, τα ηλεκτρόνια που παράγονται αποσπώμενα από αρνητικά ιόντα (ενέργεια απόσπασης  $\sim 1.5$  eV) επιταχύνονται και συγκρούμενα με τα ουδέτερα μόρια δημιουργούν διέγερση και αποδιέγερση τους (ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια διέγερσης για τα μόρια αζώτου είναι  $\sim 7.5$  eV) και συνεπώς την γένεση των μεταβατικών οπτικών φαινομένων sprites, είτε επιπλέον ιονισμό ( $\sim 15$  eV). Ο παραπάνω μηχανισμός είναι ο ίδιος με την ηλεκτρική κατάρρευση ελαφρώς ιονισμένου αερίου σε λάμπες νέου, υπό την επίδραση ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου.

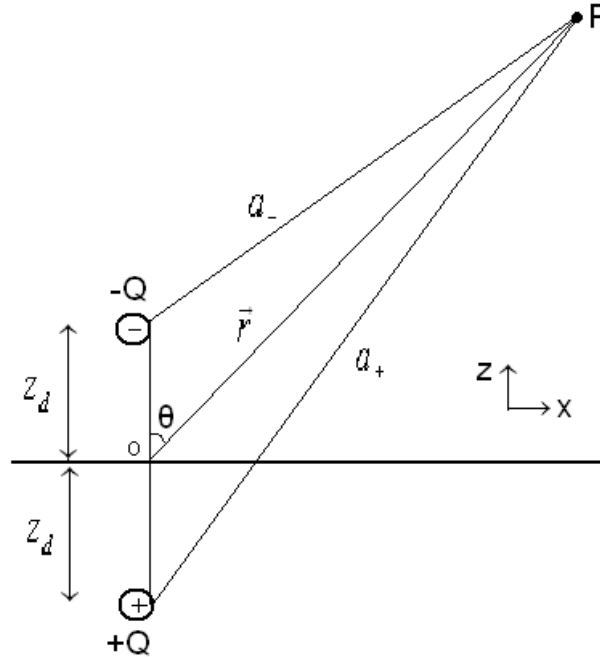
Το πεδίο κατάρρευσης είναι ανάλογο της πυκνότητας των ουδέτερων μορίων, η οποία στην ατμόσφαιρα φθίνει εκθετικά με το ύψος:

$$E_k = 3200N(z) / N_0 \text{ (kV/m)} \quad (2.1)$$

όπου  $N(z)$  η αριθμητική πυκνότητα ουδέτερων μορίων συναρτήσει του ύψους και  $N_0$  η τιμή της κοντά στο έδαφος (Pasko et al., 1997). Όταν η τιμή του πεδίου QE ξεπεράσει την τιμή του  $E_k$  αυξάνεται η πιθανότητα να δημιουργηθούν sprites.

Η ποσότητα του αρνητικού φορτίου που παραμένει πάνω από το νέφος μετά από μια θετική ηλεκτρική εκκένωση και είναι υπεύθυνο για το πεδίο QE ισούται με το θετικό φορτίο που εξουδετερώθηκε, και το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως :  $Q(t) = I_0 t$ , όπου  $I_0$  είναι η

μέση τιμή των συνεχών ρευμάτων μεταφοράς και του ‘χτυπήματος επιστροφής’ του κεραυνού. Το επαγόμενο πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ως πεδίο μονοπόλου σε αδιατάρακτο μέσο, αλλά εδώ η πηγή-φορτίο βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της Γης, η οποία είναι τέλειος αγωγός, άρα το πρόβλημα μπορεί να προσεγγιστεί με την χρήση της μεθόδου των ειδώλων (D. J. Griffiths, Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική). Θεωρούμε λοιπόν το δίπολο του Σχήματος 11:



**Σχήμα 11:** Διπολική προσέγγιση του ελεύθερου αρνητικού φορτίου που συσσωρεύεται πάνω από το νέφος και το είδωλό του στο εδάφος.

Το αρνητικό φορτίο  $Q$  ισούται με το αθωράκιστο φορτίο πάνω από το νέφος, ενώ η απόσταση  $z_d$  είναι η απόστασή του από το έδαφος. Το ζητούμενο είναι να προσδιορίσουμε την τιμή του πεδίου σε κάποιο σημείο  $P$  μακριά από την πηγή.

Με βάση το παραπάνω σχήμα, το δυναμικό διπόλου στο σημείο  $P$  δίνεται από:

$$V(P) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{\alpha_+} - \frac{1}{\alpha_-} \right), \quad (2.2)$$

κάνοντας χρήση του νόμου των συνημιτόνων έχουμε:

$$\alpha_{\pm}^2 = z_d^2 + r^2 \pm 2z_d r \cos \theta = r^2 \left( 1 + \frac{z_d^2}{r^2} \pm \frac{2z_d \cos \theta}{r} \right) \quad (2.3)$$

Για  $r \gg z_d$  ισχύει η προσέγγιση:  $a_{\pm}^2 = r^2 \left(1 \pm \frac{2z_d \cos \theta}{r}\right)$

$$\Rightarrow \frac{1}{a_{\pm}} = \frac{1}{r \sqrt{1 \pm \frac{2z_d \cos \theta}{r}}} \approx \frac{1}{r} \left(1 \mp \frac{z_d \cos \theta}{r}\right)$$

$$\Rightarrow V(r, t) = -\frac{Q(t)}{4\pi\epsilon_0} \frac{2z_d \cos \theta}{r^2} \quad (2.4)$$

Το ηλεκτροστατικό πεδίο δίνεται από την βαθμίδα δυναμικού:  $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$ , του οποίου οι σφαιρικές συντεταγμένες είναι:

$$E_r(r, \theta, t) = -\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{Q(t)}{4\pi\epsilon_0} \frac{4z_d \cos \theta}{r^3}$$

$$E_{\theta}(r, \theta, t) = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\frac{Q(t)}{4\pi\epsilon_0} \frac{2z_d \sin \theta}{r^3}$$

$$E_{\phi}(r, \theta, t) = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0$$

Η συνιστώσα  $E_{\phi}(r, \theta, t)$  είναι μηδέν καθώς το δυναμικό είναι ανεξάρτητο της αζιμουθιακής γωνίας  $\phi$ .

Για να βρούμε για ποια γωνία έχει μέγιστο και ελάχιστο το μέτρο του QE πεδίου, θεωρούμε την παράγωγο του ως προς  $\theta$  ίση με το μηδέν:

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_{\theta}^2} = \frac{Qz_d}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{16 \cos^2 \theta + 4 \sin^2 \theta}, \quad \frac{Qz_d}{4\pi\epsilon_0 r^3} = c$$

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = \frac{c(-16 \cos \theta + 4 \sin \theta)}{\sqrt{16 \cos^2 \theta + 4 \sin^2 \theta}} = -12c \frac{\cos \theta \sin \theta}{\sqrt{16 \cos^2 \theta + 4 \sin^2 \theta}}$$

Η παραπάνω παράγωγος μηδενίζεται για  $\theta=0$  και  $\theta=\pi/2$ , συνεπώς εξετάζουμε την δεύτερη παράγωγο:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} = -12c \left[ \frac{(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \sqrt{16 \cos^2 \theta + 4 \sin^2 \theta} + \frac{12 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{\sqrt{16 \cos^2 \theta + 4 \sin^2 \theta}}}{16 \cos^2 \theta + 4 \sin^2 \theta} \right]$$

για  $\theta = 0$  έχουμε  $\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} < 0$ , ενώ για  $\theta = \pi/2$ ,  $\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} > 0$

Άρα το μέγιστο του QE πεδίου έχει μέγιστο όταν  $\theta=0$ , δηλαδή ακριβώς πάνω από την ηλεκτρική εκκένωση, και δίνεται από:

$$E_r(r,t) = -\frac{1}{\pi\epsilon_0 r^3} Q(t)z_d \quad (2.5)$$

Η ένταση του πεδίου είναι ανάλογη της ποσότητας της διπολικής ροπής  $Q(t)z_d$ .

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου με τον χρόνο. Από την εξίσωση Gauss και την εξίσωση συνέχειας έχουμε:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{J}$$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις σε συνδυασμό με τον νόμο του Ohm :  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$  δίνουν:

$$\vec{\nabla} \left( \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{E} \right) = 0$$

Συνεπώς η ποσότητα εντός της παρένθεσης πρέπει να είναι μόνο συνάρτηση του χρόνου.

Η αγωγιμότητα  $\sigma$  είναι αύξουσα εκθετική συνάρτηση του ύψους :

$$\sigma = \sigma_0 e^{z/H} \quad (2.6)$$

όπου  $H$  είναι η κλίμακα ύψους και ισούται με 8 km, και  $\sigma_0 = 2.25 \cdot 10^{-14} \Omega^{-1} m^{-1}$  η αγωγιμότητα στο  $z=0$  (Haldoupris, Εισαγωγικά Στοιχεία Ατμοσφαιρικής Φυσικής).

Θεωρούμε μόνο την κατακόρυφη συνιστώσα του πεδίου:

$$\Rightarrow \frac{\partial E_z}{\partial t} + \frac{\sigma(z)}{\epsilon_0} E_z = f(t)$$

Σύμφωνα με τους Pasko et al. (1997), αν η τιμή του πεδίου διατηρείται σε κάποια σταθερή τιμή  $\vec{E}_0$  σε κάποιο όριο (π.χ. στην επιφάνεια της γης) τότε η τιμή της  $f(t)$  αναγκάζεται να παραμένει σταθερή,  $f(t) = \frac{\sigma_0 \vec{E}_0}{\epsilon_0} = \text{const}$ , ώστε

$$\Rightarrow \frac{\partial E_z}{\partial t} + \frac{\sigma(z)}{\epsilon_0} E_z = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} E_0.$$

Για να λύσουμε την παραπάνω διαφορική εξίσωση, βρίσκουμε πρώτα την λύση της αντίστοιχης ομογενούς:

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} + \frac{\sigma(z)}{\epsilon_0} E_z = 0$$

$$\Rightarrow E_{z,ομογ.} = E_0 e^{-\sigma t / \epsilon_0},$$

και στη συνέχεια βρίσκουμε την ειδική λύση. Προς τούτο, στην αρχική εξίσωση κάνουμε την αντικατάσταση  $E(t) \rightarrow k(t)A(t)$

$$\Rightarrow k'(t)A(t) + k(t)A'(t) + k(t)A(t) \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_0 E_0}{\epsilon_0}$$

$$\Rightarrow (k'(t) + k(t) \frac{\sigma}{\epsilon_0})A(t) + k(t)A'(t) = \frac{\sigma_0 E_0}{\epsilon_0}$$

Επιλέγουμε το  $k(t)$  τέτοιο ώστε να ικανοποιεί την ομογενή εξίσωση  $k'(t) + k(t) \frac{\sigma}{\epsilon_0} = 0$

$$\Rightarrow A(t) = \int \frac{\sigma_0 E_0}{\epsilon_0 k(t)} dt$$

$$\Rightarrow E_{z,ειδ.} = k(t) \int \frac{\sigma_0 E_0}{\epsilon_0 k(t)} dt$$

Εφόσον  $k(t) = e^{-\sigma t / \epsilon_0}$ , έχουμε:

$$E_{z,ειδ.} = e^{-\sigma t / \epsilon_0} \int_0^t \frac{\sigma_0 E_0}{\epsilon_0 e^{-\sigma t / \epsilon_0}} dt = \frac{\sigma_0}{\sigma} E_0 (1 - e^{-\sigma t / \epsilon_0})$$



Άρα το πεδίο συναρτήσει του ύψους και του χρόνου προκύπτει:

$$E(z,t) = E_{z,ομογ.} + E_{z,ειδ.} = E_0 e^{-\sigma t / \epsilon_0} + \frac{\sigma_0}{\sigma} E_0 (1 - e^{-\sigma t / \epsilon_0})$$

$$\Leftrightarrow E(z,t) = E_0 e^{-\sigma t / \epsilon_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma}\right) + E_0 \frac{\sigma_0}{\sigma} \quad (2.7)$$

Το ηλεκτροστατικό πεδίο  $E(z,t)$  είναι συνάρτηση του χρόνου και του ύψους (μεταβλητή που υπεισέρχεται με την ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$ ). Η μορφή του πεδίου  $E(z,t=σταθ.)$  παριστάνεται στο Σχήμα 12α συναρτήσει του ύψους για τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές, με μαύρο χρώμα. Παρατηρούμε ότι η τιμή του  $E(z,t)$  σχεδόν μηδενίζεται κοντά στο ύψος  $z = 100$  km, θέτοντας έτσι ένα άνω όριο για την δημιουργία μεταβατικών οπτικών συμβάντων. Στο ίδιο διάγραμμα παριστάνεται και το πεδίο ηλεκτρικής κατάρρευσης  $E_k(z)$ , το οποίο είναι συνάρτηση μόνο του ύψους, με κόκκινο χρώμα. Στο Σχήμα 12β φαίνονται και τα δύο πεδία σε λογαριθμική κλίμακα. Βλέπουμε ότι το  $E_k(z)$  μειώνεται εκθετικά με το ύψος (όπως προβλέπεται από την θεωρία), ενώ για  $z=0$  παίρνει την τιμή 3200kV.

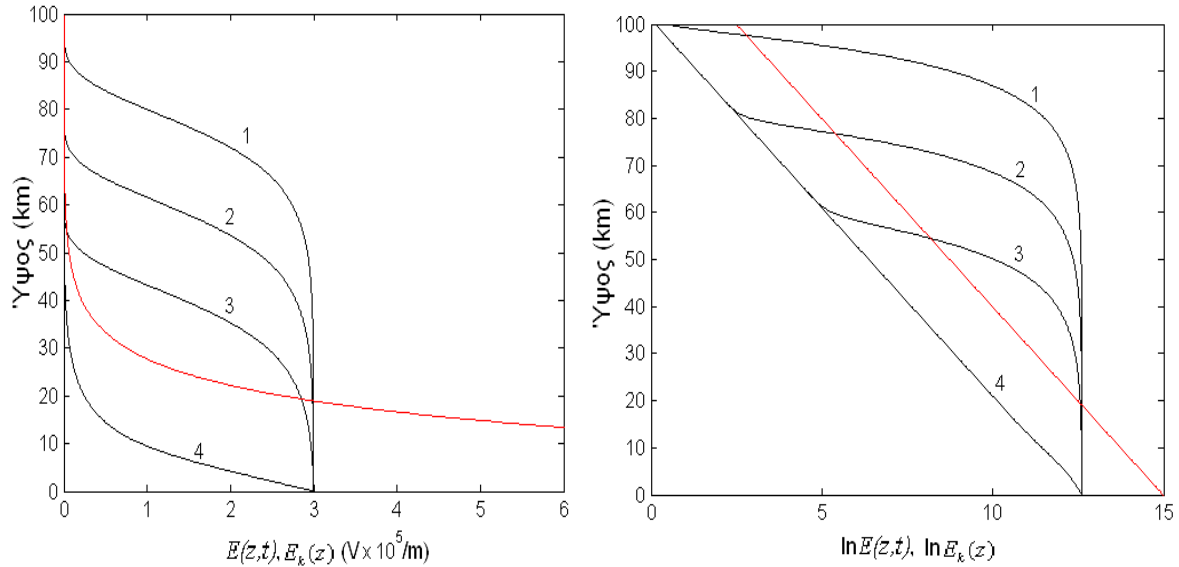
Οι τέσσερις καμπύλες αντιστοιχούν στις παρακάτω χρονικές στιγμές:

$$1: t = 0.02s \Rightarrow \sigma_0 t / \epsilon_0 = 5 \cdot 10^{-5}$$

$$2: t = 0.2s \Rightarrow \sigma_0 t / \epsilon_0 = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$3: t = 0.6s \Rightarrow \sigma_0 t / \epsilon_0 = 1.5 \cdot 10^{-3}$$

$$4: t = 400s \Rightarrow \sigma_0 t / \epsilon_0 = 1$$



**Σχήμα 12:** α. Πεδίο QE και πεδίο κατάρρευσης  $E_k$  συναρτήσει του ύψους για τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές, β. Λογάριθμος των ίδιων ποσοτήτων για τις ίδιες χρονικές στιγμές.

Το διάστημα ύψους για το οποίο το πεδίο QE έχει μεγαλύτερη τιμή από το πεδίο  $E_k$  για τις τρεις πρώτες χρονικές στιγμές είναι:

$t=0.02s$  (καμπύλη 1):  $20km \leq z \leq 100km$

$t=0.2s$  (καμπύλη 2):  $20km \leq z \leq 80km$

$t=0.6s$  (καμπύλη 3):  $20km \leq z \leq 55 km$

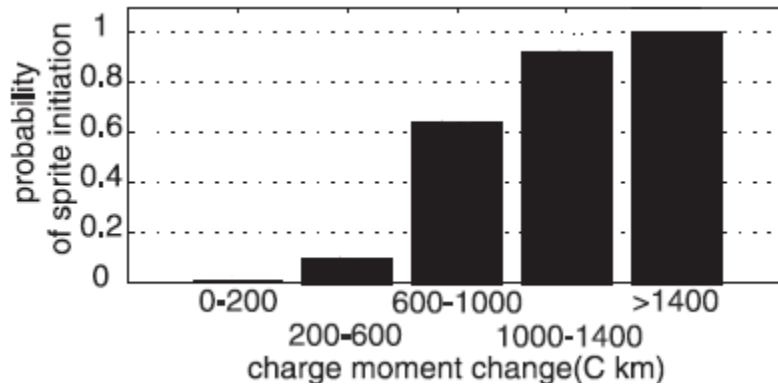
Παρατηρούμε ότι για κάθε χρονική στιγμή μετά την ηλεκτρική εκκένωση τίθεται ένα άνω όριο για το ύψος που μπορεί να λάβει χώρα μια ηλεκτρική κατάρρευση, και αντίστοιχα για την δημιουργία ενός sprite. Για παράδειγμα, 600ms μετά από μια θετική ηλεκτρική εκκένωση CG, το ανώτερο ύψος όπου μπορεί να ξεκινήσει η δημιουργία ενός sprite είναι  $\sim 55km$ , και άρα η πιθανότητα εμφάνισής του είναι μειωμένη λόγω της υψηλής πυκνότητας της ατμόσφαιρας (σε σχέση με την πυκνότητά της στο ύψος των  $\sim 70 km$ , απ' όπου ξεκινάει συνήθως η δημιουργία των sprites).

## 2.2 Διπολική ροπή (charge moment)

Όπως είδαμε παραπάνω, το πεδίο QE είναι γραμμικώς ανάλογο της διπολικής ροπής του κεραυνού, συνεπώς η μέτρησή της δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του κεραυνού που προκαλεί το sprite καθώς και για το ίδιο το sprite.

Η άμεση μέτρηση του φορτίου που μεταφέρει ένας κεραυνός απαιτεί τα όργανα να βρίσκονται σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων, πράγμα που καθιστά τις μετρήσεις για μεγαλύτερες αποστάσεις αναξιόπιστες. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται μια διαφορετική τεχνική μέτρησης της διπολικής ροπής, η οποία βασίζεται στην ανίχνευση της ακτινοβολίας ELF ( Extra Low Frequency : <2 kHz), η οποία εκπέμπεται από τον κεραυνό και διαδίδεται σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων στον κυματοδηγό γης-ιονόσφαιρας. Η ακτινοβολία ELF την οποία εκπέμπει ο κεραυνός που σχετίζεται με sprite υποδεικνύει ότι τα sprites σχετίζονται με ισχυρά συνεχή ρεύματα στον κεραυνό (continuing currents), διάρκειας 1-100 ms, τα οποία μεταφέρουν μεγάλη ποσότητα φορτίου από το νέφος στο έδαφος ( ή αντίστροφα) και δημιουργούν ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο στην ατμόσφαιρα.

Είναι γνωστό ότι η τιμή της διπολικής ροπής πρέπει να ξεπερνά κάποιο κατώτερο όριο ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία ισχυρού πεδίου QE που οδηγεί σε ηλεκτρική κατάρρευση και γένεση sprite στη ανώτερη ατμόσφαιρα. Όμως δεν υπάρχει ένα μοναδικό και ακριβώς καθορισμένο κατώφλι για την δημιουργία των sprites, καθώς υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες, όπως η αγωγιμότητα της ατμόσφαιρας και η πυκνότητα των ουδέτερων συστατικών της. Ισχυρές ηλεκτρικές εκκενώσεις με μεγάλες διπολικές ροπές έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να δημιουργήσουν sprites, ενώ η πιθανότητα δημιουργίας από μικρότερες εκκενώσεις θα εξαρτηθεί και από άλλους παράγοντες. Για να υπολογιστεί η πιθανότητα εμφάνισης sprite, χρειάζεται η κατανομή της μεταβολής της διπολικής ροπής στους θετικούς κεραυνούς. Για θετικούς κεραυνούς με διπολική ροπή μικρότερη των 600 Ckm η πιθανότητα να δημιουργηθεί sprite είναι <10% , και είναι απαραίτητη η ύπαρξη ειδικών συνθηκών. Για θετικούς κεραυνούς με διπολική ροπή μεγαλύτερη των 1000Ckm η πιθανότητα για εμφάνιση ενός sprite ξεπερνά το 90%. Στην ενδιάμεση περιοχή μεταξύ των 600 και 1000 C km η πιθανότητα είναι γύρω στο 60% (Σχ.13) (Wenyi et al., 2002).



Σχήμα 13: Πιθανότητα δημιουργίας sprite συναρτήσει της διπολικής ροπής.

### 2.3 Στοιχεία διάδοσης HM ακτινοβολίας VLF στον κυματοδηγό Γης-ιονόσφαιρας

Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφερθήκαμε στον κυματοδηγό Γης- ιονόσφαιρας χωρίς να γίνει περαιτέρω εξήγηση του όρου. Εδώ θα περιγράψουμε σε γενικές γραμμές την θεωρία διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε κυματοδηγό. Ο κυματοδηγός είναι μια κοιλότητα, η οποία μπορεί να έχει διάφορα γεωμετρικά σχήματα, με τέλεια αγωγή τοιχώματα. Το σύστημα Γης – ιονόσφαιρας είναι μια καλή προσέγγιση κυματοδηγού, επειδή η επιφάνεια της Γης και η ιονόσφαιρα είναι πολύ καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του ατμοσφαιρικού αέρα,  $\epsilon$ , είναι εξαιρετικά κοντά στην τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του κενού ( $\epsilon_0 / \epsilon = 0.999$ ).

Τα παρακάτω στοιχεία βασίστηκαν στο βιβλίο του D.J. Griffiths, ‘Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική’.

Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 1, η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων αλλά και των ιόντων στην ιονόσφαιρα παίζει σημαντικό ρόλο στην διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ιονόσφαιρα είναι ένας καλός αγωγός, και εξαιτίας του ελεύθερου φορτίου της αντανάκλα την προσπίπτουσα HM ακτινοβολία, εφόσον η συχνότητά της είναι μικρότερη της συχνότητας πλάσματος. Στην περίπτωση των κυμάτων VLF που

εξετάζουμε η ανάκλαση γίνεται περί τα 85km, και οι συνθήκες ανάκλασης περιγράφονται παρακάτω:

Οι εξισώσεις Maxwell για γραμμικά μέσα έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \rho_f / \varepsilon & \text{(iii)} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{(ii)} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 & \text{(iv)} \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu\sigma\vec{E} + \mu\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Αν εφαρμόσουμε τον στροβιλισμό στις εξισώσεις (iii) και (iv), προκύπτουν οι :

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \nabla^2 \vec{B} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Οι λύσεις των παραπάνω εξισώσεων είναι επίπεδα κύματα:

$$\vec{E}(x,t) = \vec{E}_0(x,t)e^{i(\kappa x - \omega t)} \quad \vec{B}(x,t) = \vec{B}_0(x,t)e^{i(\kappa x - \omega t)} \quad (2.9)$$

Όπου  $\vec{E}_0$  και  $\vec{B}_0$  μιγαδικές σταθερές,  $\omega$  =συχνότητα του κύματος, και  $\kappa$  = κυματαριθμός.

Ο κυματαριθμός  $\kappa$  σε αυτή την περίπτωση είναι μιγαδικός, και υπολογίζεται εύκολα με αντικατάσταση των (2.9) στις εξισώσεις (2.8).

$$\kappa^2 = \mu\varepsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega \quad (2.10)$$

$$\Rightarrow \kappa = \kappa_+ + i\kappa_- \quad , \quad \kappa_{\pm} = \omega\sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2}\left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right)^2} \pm 1\right]^{1/2}}$$

Μπορούμε να ξαναγράψουμε τις εξισώσεις (2.9) στην παρακάτω μορφή;

$$\vec{E}(x,t) = \vec{E}_0(x,t)e^{-\kappa_-x}e^{i(\kappa_+x - \omega t)} \quad , \quad \vec{B}(x,t) = \vec{B}_0(x,t)e^{-\kappa_-x}e^{i(\kappa_+x - \omega t)}$$

Για τα φυσικά κύματα θεωρούμε το πραγματικό μέρος των παραπάνω εκφράσεων. Βλέπουμε ότι στην διάδοση ενός ΗΜ κύματος σε αγωγό υπεισέρχεται ο όρος  $e^{-\kappa_-x}$  που εξασφαλίζει την εκθετική μείωση του πλάτους του. Η απόσταση (μήκος διείσδυσης) μετά την οποία το πλάτος κύματος έχει μειωθεί κατά έναν παράγοντα 1/e ονομάζεται επιδερμικό βάθος και εκφράζεται ως :  $d = 1/\kappa_-$ .

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της αγωγιμότητας:

$$\sigma = i \frac{N_e e^2}{m_e \omega} \quad (2.11)$$

και τις προσεγγίσεις  $\mu \approx \mu_0, \varepsilon \approx \varepsilon_0$  για τον ατμοσφαιρικό αέρα, μπορούμε να ξαναγράψουμε το  $\kappa$  στην παρακάτω μορφή:

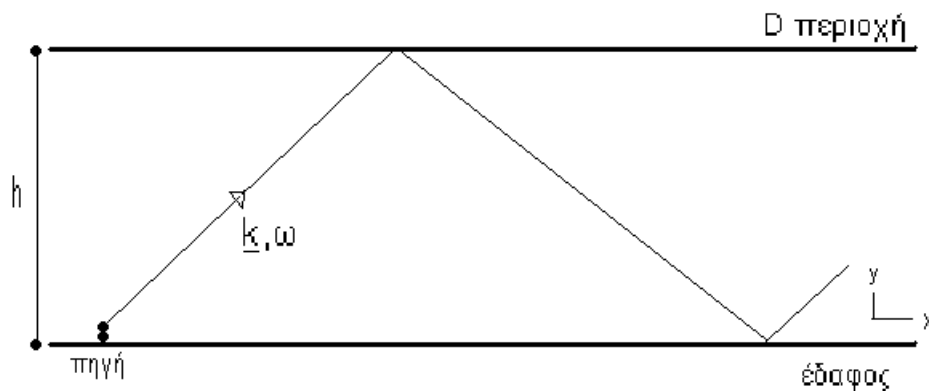
$$\kappa^2 = \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 - \frac{N_e e^2}{m_e \omega} \mu_0 \omega = \mu_0 \varepsilon_0 \left( \omega^2 - \frac{N_e e^2}{m_e \varepsilon_0} \right) = \frac{1}{c^2} (\omega^2 - \omega_p^2) \quad (2.12)$$

όπου  $\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \varepsilon_0}}$  = συχνότητα πλάσματος,  $\omega$  = συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος,

$c$  = ταχύτητα του φωτός.

Όταν  $\omega > \omega_p$ , ο κυματαριθμός είναι πραγματικός και η ιονόσφαιρα είναι διαπερατή από το κύμα, το οποίο και διαδίδεται χωρίς απόσβεση. Το κύμα υφίσταται ανάκλαση όταν πληρείται η προϋπόθεση:  $\kappa = \text{φανταστικός}$ , δηλαδή όταν ισχύει  $\omega < \omega_p$ .

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε το πρόβλημα του κυματοδηγού σε δύο διαστάσεις: Ένα επίπεδο κύμα με κυματόνυσμα  $\vec{\kappa}$  και συχνότητα  $\omega$  εκπέμπεται από την πηγή, το οποίο στη συνέχεια ανακλάται τέλεια από την περιοχή D (το επιδερμικό βάθος είναι μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος και η απώλεια ενέργειας είναι αμελητέα) (Σχήμα 14).



**Σχήμα 14:** Διάδοση VLF κυμάτων στον κυματοδηγό Γης – ιονόσφαιρας

Στην κατεύθυνση  $y$  τα πολλαπλώς ανακλώμενα κύματα συμβάλλουν, σχηματίζοντας στάσιμες κυματομορφές μήκους κύματος  $\lambda_y = 2h/n$ , με  $n = \text{ακέραιος } (1,2,3\dots)$ . Η

συνισταμένη του κυματανύσματος στον y άξονα είναι:  $\kappa_y = n\pi / h$ , ενώ στον x:  $\kappa_x = \kappa$ . Η συχνότητα διάδοσης του αρχικού κύματος είναι :

$$\omega = c |\kappa| = c \sqrt{\kappa^2 + \left(\frac{\pi n}{h}\right)^2} = \sqrt{(c\kappa)^2 + (\omega_n)^2}$$

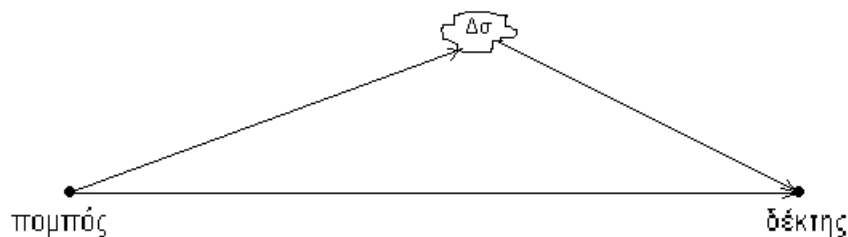
$$\Rightarrow \kappa = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \left(\frac{\pi n}{h}\right)^2} = \frac{1}{c} \sqrt{\omega^2 - \omega_n^2} \quad (2.13)$$

Αν  $\omega < \omega_n$  ο κυματαριθμός γίνεται φανταστικός και αντί για οδεύον κύμα παίρνουμε ηλεκτρικό πεδίο που σβήνει εκθετικά. Άρα δεν μπορούν να διαδοθούν κύματα με οποιαδήποτε συχνότητα στον κυματοδηγό, συνεπώς υπάρχει μια συχνότητα αποκοπής που θέτει ένα άνω όριο στην αρχική τιμή του  $\omega$ .

Τα κύματα συχνοτήτων 3 -30 kHz (VLF) που χρησιμοποιούμε για την ανίχνευση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε συνδυασμό με TLEs διαδίδονται στον κυματοδηγό Γης – ιονόσφαιρας, με αποτέλεσμα να ταξιδεύουν για χιλιάδες χιλιόμετρα με ελάχιστη απώλεια ενέργειας.

## 2.4 Σκέδαση των κυμάτων VLF από ιονοσφαιρικές διαταραχές

Όπως αναφέρθηκε πριν, μετά από μια θετική ηλεκτρική εκκένωση δημιουργείται το ημιστατικό ηλεκτρικό πεδίο, εξαιτίας του οποίου συμβαίνουν τοπικές διαταραχές στην αγωγιμότητα της κατώτερης ιονόσφαιρας που οφείλονται κυρίως σε μεταβολές της ηλεκτρονικής πυκνότητας. Αυτές οι διαταραχές, εξαιτίας της μεταβολής του δείκτη διάθλασής τους, προκαλούν σκέδαση των προσπιπτόντων κυμάτων VLF. Στο παρακάτω σχήμα (15) φαίνονται οι διαδρομές δύο κυμάτων: εκείνου που υφίσταται σκέδαση από την τοπική διαταραχή, και εκείνου που η διαδρομή του δεν επηρεάζεται από την τοπική διαταραχή.



**Σχήμα 15:** σκέδαση VLF ακτινοβολίας από τοπική ιονοσφαιρική διαταραχή

Το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης είναι η υπέρθεση των δύο κυμάτων, η οποία μπορεί να είναι ενισχυτική ή καταστρεπτική εξαιτίας της διαφοράς των δρόμων των δύο κυμάτων και της μεταβολής της φάσης του σκεδαζόμενου κύματος.

Η σκέδαση των κυμάτων VLF από τις διαταραχές της ιονόσφαιρας διαφέρει από τον μηχανισμό ανάκλασής τους από κάποιο στρώμα της ιονόσφαιρας. Την περίπτωση της σκέδασης πρέπει να την εξετάσουμε μακροσκοπικά, έτσι ώστε να κατανοήσουμε τον μηχανισμό της ανάκλασης και της διάθλασης του προσπίπτοντος κύματος VLF από περιοχές οι οποίες εξαιτίας διαταραχών ηλεκτρονικής πυκνότητας (π.χ. στην περιοχή των sprites) έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης από το υπόλοιπο μέσο.

Θεωρούμε την περιοχή D της ιονόσφαιρας ως διηλεκτρικό με ανομοιογενή δείκτη διάθλασης (εξαιτίας των τοπικών διαταραχών). Σε αυτή την περίπτωση ο δείκτης διάθλασης έχει την μορφή:

$$n^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (\text{D. J. Griffiths, Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική, Τόμος II}) \quad (2.14)$$

όπου  $\epsilon$  η διηλεκτρική σταθερά του αέρα,  $\omega$  η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος και  $\sigma$  η αγωγιμότητα του αέρα. Στην κατώτερη ιονόσφαιρα ο δείκτης διάθλασης είναι ανάλογος της αγωγιμότητας  $\sigma$ , καθώς  $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \ll 1$ .

Αν αγνοήσουμε την επίδραση του μαγνητικού πεδίου, η αγωγιμότητα της D περιοχής εκφράζεται ως:

$$\sigma = \frac{e^2 N_e}{m_e \nu_e} \quad (\text{D. J. Griffiths, Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική, Τόμος II}) \quad (2.15)$$



όπου  $\nu_e$  η συχνότητα κρούσεων μεταξύ ηλεκτρονίων και ουδέτερων μορίων, και  $N_e$  είναι η ηλεκτρονική πυκνότητα.

$$\Rightarrow n^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \frac{i}{\omega\epsilon_0} \frac{e^2 N_e}{m_e \nu_e}$$

Και κάνοντας την αντικατάσταση  $\omega_p^2 = \frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0}$ , όπου  $\omega_p$  η συχνότητα πλάσματος,

παίρνουμε:

$$n^2 \approx 1 - \frac{i\omega_p^2}{\omega\nu_e} \quad (2.16)$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από την συχνότητα κρούσεων που με την σειρά της εξαρτάται από την θερμοκρασία και από την πυκνότητα ηλεκτρονίων. Για το όριο  $\nu_e \rightarrow \infty$ , ο δείκτης διάθλασης τείνει στη μονάδα, συνεπώς το πλάτος του κύματος φθίνει γρήγορα και στη συνέχεια ανακλάται προς διαφορετική κατεύθυνση (Mika, 2007).

Άλλη μια σημαντική παράμετρος είναι η γεωμετρία της διαταραχής, δηλαδή το σχήμα, το εύρος, καθώς και το πόσο διάχυτη ή καλώς δομημένη είναι η διαταραχή. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζουν όχι μόνο την γωνία αλλά και το είδος της σκέδασης. Σε περίπτωση που έχουμε διάχυτες περιοχές ιονισμού οριζόντιας έκτασης  $>100\text{km}$ , και κατακόρυφης έκτασης μικρότερη του μήκους κύματος, η δέσμη VLF κυμάτων υφίσταται περίθλαση Fraunhofer. Σε αυτή την περίπτωση, και αν η περιοχή της διαταραχής δεν βρίσκεται μακρύτερα από  $\sim 250\text{ km}$  από την νοητή γραμμή που ορίζει την κοντινότερη απόσταση πομπού και δέκτη, έχουμε ισχυρή σκέδαση προς τα εμπρός με μικρή γωνία απόκλισης. Αυτός ο μηχανισμός είναι κατάλληλος να περιγράψει την σκέδαση από διάχυτα sprites μεγάλης οριζόντιας έκτασης, τα halos - τα οποία παρατηρούνται άλλοτε μαζί με τα sprites και άλλοτε ανεξάρτητα από αυτά, αλλά και από συστάδες αποτελούμενες από C-sprites που λειτουργούν σαν φράγμα περίθλασης (Mika, 2007).

Όμως έχει παρατηρηθεί και σκέδαση των VLF κυμάτων σε μεγάλες γωνίες, με την ακραία περίπτωση της οπισθοσκέδασης. Η οπισθοσκέδαση δεν μπορεί να εξηγηθεί από την κατευθυντική περίθλαση Fraunhofer και απαιτεί την ύπαρξη καλώς δομημένου και μικρών - σε σχέση με το μήκος κύματος - ανομοιογενειών, όπως για παράδειγμα τα C - sprites, τα

οποία αποτελούν στενόμακρες περιοχές ιονισμού. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αυτών των περιοχών συμμετέχουν στην διαδικασία εκπομπής, μέσω ρευμάτων που δημιουργούνται στα sprites, επανεκπέμποντάς την προσπίπτουσα ακτινοβολία προς κάθε κατεύθυνση (Mika, 2007).

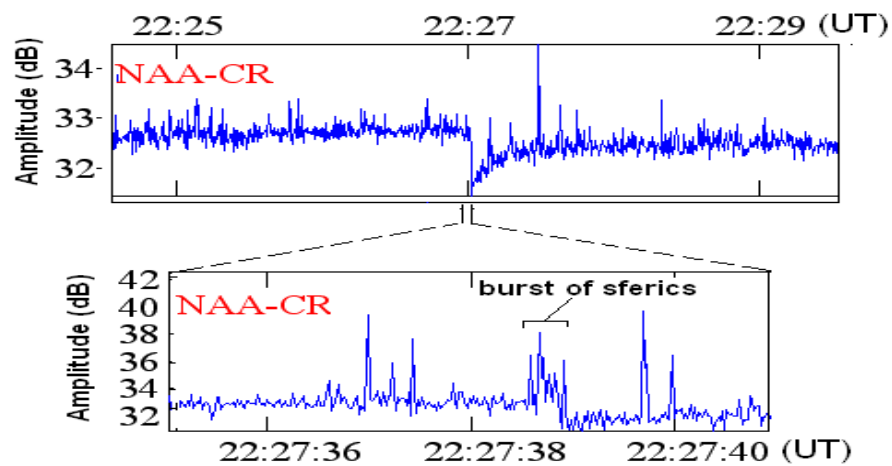
## 2.5 Διαταραχές VLF και sprites

Κατά την διάρκεια των ηλεκτρικών εκκενώσεων εκπέμπεται ισχυρή VLF ακτινοβολία, η οποία φτάνει και καταγράφεται στον δέκτη. Η αντίστοιχη διαταραχή στο σήμα που λαμβάνουμε έχει την μορφή απότομων διαδοχικών κορυφών, η κάθε μια με εύρος που δεν ξεπερνάει τα μερικά ms (παρακάτω αναφερόμαστε σε αυτές ως burst of sferics).

Οι διαταραχές του VLF σήματος στις οποίες επικεντρωνόμαστε σε αυτή την εργασία ονομάζονται early events και παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά το 1983 από τον Armstrong. Έξι χρόνια αργότερα από την ανακάλυψή τους η παρουσία τους συσχετίστηκε με την ύπαρξη των TLEs, κυρίως των sprites. Στην περιοχή όπου συμβαίνει το sprite μπορεί να δημιουργηθεί επαρκής ιονισμός, δηλαδή μια ανομοιογένεια στην ηλεκτρονική πυκνότητα αρκετή να προκαλέσει μία διαταραχή τύπου early μικρής ή μεγάλης έντασης. Το ποσοστό με το οποίο σχετίζονται τα δύο παραπάνω έχει αποτελέσει θέμα διαμάχης για διάφορες ερευνητικές ομάδες, και αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Σύμφωνα με κάποιες έρευνες το ~70% των sprites προκαλούν διαταραχές τύπου early, έχουν όμως αναφερθεί και περιπτώσεις μη συσχέτισης των οπτικών φαινομένων και των διαταραχών αυτών.

Οι διαταραχές τύπου early είναι απότομες αλλαγές της έντασης και/ ή της φάσης του VLF σήματος, και οφείλονται στις διαταραχές της πυκνότητας ηλεκτρονίων κάτω από το υψόμετρο ανάκλασης των VLF κυμάτων. Συνήθως λαμβάνουν χώρα ~20ms μετά από την CG ηλεκτρική εκκένωση στην οποία οφείλονται, και φτάνουν στο μέγιστο ύψος σε λιγότερο από 20 ms. Ο χρόνος επαναφοράς του σήματος στα αρχικά επίπεδα του θορύβου είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, καθώς η ομαλή πορεία επαναφοράς μπορεί να διακοπεί από άλλες διαταραχές. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις μας αυτός ο χρόνος κυμαίνεται από δέκατα του δευτερολέπτου έως μερικές εκατοντάδες δευτερόλεπτα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της διαταραχής αυτής - χάρη στα οποία ξεχωρίζει από παρόμοιες διαταραχές - είναι ο εξαιρετικά μικρός χρόνος καθυστέρησης από την ηλεκτρική εκκένωση CG, που δείχνει μια άμεση αλληλεπίδραση των τροποσφαιρικών κεραυνών και της κατώτερης ιονόσφαιρας, και ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για να φτάσουν στην μεγαλύτερη ένταση, ο οποίος σχετίζεται με τη διάρκεια των συνεχών ρευμάτων την ηλεκτρικής εκκένωσης (τα οποία διαρκούν μερικά ms). Ο χρόνος επαναφοράς σχετίζεται άμεσα με τον χρόνο επανασύνδεσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην περιοχή της διαταραχής, και μπορεί να σχετιστεί με το υψόμετρο που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο, καθώς ο μικρότερος χρόνος επανασύνδεσης σημαίνει πυκνότερη ατμόσφαιρα και άρα χαμηλότερο υψόμετρο. Μια χαρακτηριστικές διαταραχές τύπου early φαίνονται στο Σχήμα16, στο κέντρο του διαστήματος παρατήρησης.



**Σχήμα 16:** Διαταραχή τύπου early και bursts of sferics

Κατά τη διάρκεια μιας ηλεκτρικής εκκένωσης εκπέμπεται ΗΜ ακτινοβολία σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Η ακτινοβολία αυτή φτάνει στον δέκτη χωρίς να έχει υποστεί αλληλεπίδραση με υπο-ιονοσφαιρικές διαταραχές, και εμφανίζεται στο σήμα σαν μια ομάδα απότομων διαταραχών (burst of sferics), η κάθε μια από τις οποίες έχει διάρκεια μερικών ms (Σχήμα 16). Ένα sferic ή μια ομάδα sferics εμφανίζονται πάντα πριν από κάθε διαταραχή τύπου early, και δείχνουν τον χρόνο εμφάνισης αλλά και την πολλαπλότητα της ηλεκτρικής εκκένωσης που προκάλεσε την διαταραχή αυτή.

# Κεφάλαιο 3: Μετρήσεις, Ανάλυση και Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, το οποίο είναι και το κυριότερο μέρος της εργασίας, γίνεται παρουσίαση του πειράματος, των πειραματικών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν και των μετρήσεων. Οι χρονοσειρές VLF που εξετάστηκαν για τον σκοπό της εργασίας αναλύθηκαν στην περιοχή του χρόνου και των συχνοτήτων (time and frequency domain analysis), και τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δύο ξεχωριστά υποκεφάλαια.

## 3.1 Πειραματικά συστήματα

Για να εξετάσουμε τα sprites και τις διαταραχές τύπου early, χρειαζόμαστε τον κατάλληλο εξοπλισμό που στην παρούσα μελέτη περιλαμβάνει: video-κάμερες των οποίων το οπτικό πεδίο τους είναι η ανώτερη ατμόσφαιρα πάνω από κεραυνο-καταιγίδες οι οποίες είναι πιθανόν να δημιουργήσουν TLE (κυρίως sprites και elves), πομπούς και δέκτες VLF κυμάτων των οποίων η ζεύξη τους στο κυματοδηγό γης-ιονόσφαιρας GCP (great circle path) διέρχεται από το πεδίο κάλυψης των οπτικών συστημάτων παρατήρησης TLE, καθώς και ανιχνευτές κεραυνών νέφους-εδάφους και προσδιορισμού των παραμέτρων τους (χρόνος, τόπος, ένταση ρεύματος και πολικότητας). Μια περιληπτική περιγραφή αυτών, η οποία θεωρείται επαρκής για την παρούσα εργασία δίνεται παρακάτω. Για περισσότερες λεπτομέρειες βλέπε Mika, 2007.

Η προσπάθεια της παρατήρησης των sprites πάνω από την Ευρώπη συντονίζεται από το Danish Space Research Institute (DSRI), το οποίο οργανώνει και υλοποιεί τις παρατηρησιακές καμπάνιες *EuroSprite* κάθε καλοκαίρι από το έτος 2000. Ο σκοπός της κάθε καμπάνιας είναι να φέρει σε συνεργασία διάφορες επιστημονικές ομάδες και να θέσει σε λειτουργία πειραματικά συστήματα ώστε να συνεργασθούν για συντονισμένες παρατηρήσεις φαινομένων TLE (sprites και elves) όπως και των παραλλήλων επιδράσεων στην ανώτερη ατμόσφαιρα και την κατώτερη ιονόσφαιρα.

**Οπτικό σύστημα καταγραφής TLE:** Οι οπτικές παρατηρήσεις γίνονται από το σύστημα *Spritewatch*, το οποίο είναι εγκαταστημένο σε υψόμετρο 2877 m στο παρατηρητήριο Pic du Midi στα Πυρηναία όρη της Γαλλίας. Αποτελείται από δύο video-κάμερες ευαίσθητες σε χαμηλή φωτεινότητα με ελάχιστο χρόνο έκθεσης (frame time) 20 ms, η λειτουργία των οποίων είναι αυτόματη και γίνεται μέσω υπολογιστικού συστήματος που ελέγχεται μακρόθεν μέσω internet. Οι κάμερες είναι τοποθετημένες σε μηχανικό σύστημα pan tilt, που επιτρέπει πλήρη αζιμουθιακό και ζενιθιακό προσανατολισμό, το οποίο επίσης ελέγχεται μέσω του ιδίου υπολογιστή και του διαδικτύου. Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων εικόνων (images) το λειτουργικό ανιχνεύει την εμφάνιση των πιθανών μεταβατικών οπτικών συμβάντων οι εικόνες των οποίων στη συνέχεια αποθηκεύονται στον υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.

**Πομποί VLF:** Διάφορες χώρες χρησιμοποιούν μεγάλες εγκαταστάσεις πομπών VLF, κυρίως με σκοπό την επικοινωνία με στρατιωτικά υποβρύχια (Rodger, 2003), καθώς το επιδερμικό βάθος για μια συχνότητα 10 kHz και για το θαλάσσιο νερό είναι ~1,1 m (Mika, 2007). Οι πομποί αυτοί βρίσκονται συνεχώς σε λειτουργία και έχουν μεγάλη ακτινοβολούμενη ισχύς, για αυτό εκτός από στρατιωτικούς σκοπούς χρησιμοποιούνται ευρέως και στην επιστημονική έρευνα, αφού τα κύματα VLF ανακλώνται στην κατώτερη ιονόσφαιρα και είναι κατάλληλα για την μελέτη μεταβατικών οπτικών φαινομένων. Τα κύματα VLF που ταξιδεύουν στον κυματοδηγό Γη- ιονόσφαιρα, έχουν μικρή απόσβεση της τάξης των 2 – 3 dB/Mm. Για να επιτευχθεί ακτινοβολούμενη ισχύς 100 – 1000 kW χρησιμοποιούνται, εκτός από ισχυρούς πομπούς, μεγάλου μήκους κεραίες (λόγω του μεγάλου μήκους κύματος στα VLF από 10-100 km). Η κεραία στην οποία η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος σχηματίζει ένα στάσιμο κύμα αποτελεί το ένα άκρο του ακτινοβολούντος διπόλου, ενώ τον ρόλο του δεύτερου άκρου παίζει το είδωλό του που σχηματίζεται στο έδαφος. Για την συγκράτηση τέτοιων μεγάλων κεραιών χρησιμοποιούνται υψηλοί πύργοι, ή κολώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, ή φυσικά γεωγραφικά χαρακτηριστικά ενός τοπίου, όπως π.χ., τα ανενεργά ηφαίστεια στην Χαβάη ή υψηλά σημεία στα Φιόρδ στη Νορβηγία.

Οι σταθμοί (κωδικός, συχνότητα και χώρα), το σήμα των οποίων καταγράφεται από τον δέκτη VLF της Κρήτης, καθώς και οι γεωγραφικές των συντεταγμένες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Call sign	Frequency (kHz)	Location	Country	Coordinates (lat;lon)
<b>HWU</b>	18.3	Le Blanc (Rosnay)	FRA	46° 37' N ; 01° 05' E
<b>ICV</b>	20.27	Tavolara	ITA	40° 55' N ; 09° 45' E
<b>RJH63</b>	20.5	Arkhangelsk	RUS	64° 22' N ; 41° 35' E
<b>HWV</b>	20.9	Saint Assis	FRA	48° 33' N ; 02° 34' E
<b>GQD</b>	22.1	Anthorn	GB	54° 43' N ; 03° 18' W
<b>DHO</b>	23.4	Burlage(Remsloh)	GER	53° 05' N ; 07° 40' E
<b>NAA</b>	24.0	Cutler, Maine	USA	44° 38' N ; 67° 17' W
<b>TBB</b>	26.7	Bafa	TUR	37° 28' N ; 27° 30' E
<b>NRK</b>	37.5	Grindavic	ICE	63° 57' N ; 22° 28' W
<b>NAU</b>	40.75	Aguada	P.RIC	18° 23' N ; 67° 11' W
<b>NSY</b>	45.9	Niscemy	ITA	37° 06' N ; 14° 06' E
<b>CRE</b>	Δέκτης VLF	Crete	GRE	35° 06' N ; 25° 12' E

**Πίνακας 1:** οι σταθμοί το σήμα των οποίων καταγράφεται από τον VLF δέκτη στην Κρήτη

**Δέκτης VLF:** όλες οι μετρήσεις των VLF κυμάτων που χρησιμοποιούνται παρακάτω έχουν γίνει από ειδικό δέκτη που βρίσκεται στο Πανεπιστήμιο Κρήτης, ο οποίος έχει τεθεί σε λειτουργία από τον Ιούλιο του 2003 σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Stanford, απ' όπου και διατέθηκε. Η κεραία, η οποία είναι τοποθετημένη στην οροφή του κτιρίου Φυσικής του Π.Κ., είναι ευρυγωνική καθόσον αποτελείται από ένα τετράγωνο βρόγχο  $1.7 \times 1.7 \text{ m}^2$ , αλλά αρκετά ευαίσθητη και ικανή να ανιχνεύει τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου των διερχόμενων ΗΜ κυμάτων μεταξύ 10 και 45 kHz. Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στα άκρα του βρόγχου λόγω διακυμάνσεων του μαγνητικού πεδίου διοχετεύεται σε έναν μετασχηματιστή. Έπειτα το σήμα μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό και καταγράφεται σε πραγματικό χρόνο που παρέχεται από σύστημα GPS (Global Positioning System). Το λογισμικό HAIL, το οποίο έχει διατεθεί από το Πανεπιστήμιο του Stanford και είναι εγκαταστημένο στον υπολογιστή που καταγράφει τα δεδομένα, είναι

προγραμματισμένο έτσι ώστε να καταγράφει τις διακυμάνσεις του πλάτους και της φάσης του σήματος συναρτήσει του χρόνου από τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον κάθε πομπό (πίνακας 1) και έχει συλλέξει ο δέκτης.

**Σύστημα ανίχνευσης κεραυνών:** Τα συστήματα ανίχνευσης κεραυνών καταγράφουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται κατά την διάρκεια των ηλεκτρικών εκκενώσεων. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια στο ιονισμένο κανάλι του κεραυνού νέφους – εδάφους έχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Οι ανιχνευτές λειτουργούν είτε σε χαμηλές συχνότητες (Low frequencies: 30–300 kHz) είτε σε πολύ υψηλές (30–300 MHz) για να αποφεύγονται οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο θόρυβος.

Τα συστήματα χαμηλών συχνοτήτων είναι κατάλληλα για την ανίχνευση του κτυπήματος επιστροφής (return stroke) στις ηλεκτρικές εκκενώσεις CG, ενώ εκείνα που χρησιμοποιούν υψηλές συχνότητες ανιχνεύουν τις πιο απότομες μεταβολές του ρεύματος όπως στον κυματοδηγό αλλά και τις ενδονεφικές (IC) ηλεκτρικές εκκενώσεις.

Για τον καθορισμό της τοποθεσίας του κεραυνού χρειάζονται τουλάχιστον τρεις ανιχνευτές και τεχνικές γωνιακής τριγωνοποίησης (triangulation) που κάνουν χρήση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του κύματος σε κάθε ανιχνευτή. Το μέγιστο μεταφερόμενο φορτίο (pick current) προσδιορίζεται από την ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που καταγράφει ο ανιχνευτής, καθώς η τιμή του εξαρτάται γραμμικά από την τιμή του μεταφερόμενου φορτίου (*Idone et al., 1993*).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις του METEORAGE, του Γαλλικού εθνικού δικτύου ανίχνευσης κεραυνών, το οποίο καλύπτει όλη την Γαλλική επικράτεια. Από εκεί παίρνουμε πληροφορίες για τον χρόνο εμφάνισης του κεραυνού με ακρίβεια ενός μs, τον τόπο όπου έλαβε χώρα με μια μέση ακρίβεια 1.0 km, την πολλαπλότητα των κτυπημάτων επιστροφής, την ένταση του ρεύματος του κτυπήματος επιστροφής (return stroke) όπως και την πολικότητα, η οποία αφορά την φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αποδοτικότητα ανίχνευσης του METEORAGE φτάνει ~ 90%.

### 3.2 Ανάλυση χρονοσειρών VLF

Στην καμπάνια *EuroSprite2007* ανιχνεύθηκαν 194 sprites κατά τη διάρκεια 12 καταιγίδων πάνω από την νοτιοδυτική Ευρώπη. Από αυτά αναλύουμε παρακάτω τα 73 (δηλαδή ποσοστό ~ 37% επί του συνόλου), τα οποία αντιστοιχούν σε παρατηρήσεις τεσσάρων ημερών για τις οποίες ήταν διαθέσιμες ταυτόχρονες μετρήσεις (χρονοσειρές VLF) του δέκτη της Κρήτης για όλους του πομπούς. Για τα υπόλοιπα συμβάντα (~ 121), ατυχώς, ο δέκτης ήταν εκτός λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα, το οποίο θα αναλυθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια παρακάτω, έδειξαν ότι στις δύο από τις τέσσερις μέρες που εξετάσαμε, όλα τα sprites σχετίζονται με διαταραχές τύπου early, ενώ στις άλλες δύο μέρες το ποσοστό αγγίζει το μηδέν. Η ανάλυση όμως με την χρήση των wavelets φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητη, και δίνει μια χαρακτηριστική εικόνα συσχέτισης για το 93% των περιπτώσεων, καθιστώντας αυτή την μέθοδο ενδιαφέρουσα για περαιτέρω διερεύνηση. Η συνοπτική παρουσίαση των sprites που εξετάζονται εδώ για κάθε καταιγίδα όπως και συναφών παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Ημερομηνία	17/09/07	11/10/07	16/10/07	15-16/10/07
Διάρκεια παρατήρησης	36 min	175 min	132 min	131 min
Sprites	10	29	13	21
Συσχέτιση με +CG (%)	70	79	92	86
Μέση ένταση των υπεύθυνων +CG (kA)	46,50	54,53	84,33	137,35
Αριθμός των +CG χωρίς sprites	213	1020	290	371
Μέση ένταση όλων των +CG (kA)	32,65	16,05	19,38	45,86
Αριθμός των -CG	751	12418	2099	1235
Μέση ένταση όλων των -CG (kA)	-14,31	-18,82	-19,08	-22,35



<b>Αριθμός των early διαταραχών</b>	10	0	0	21
<b>Wavelet sprite signatures</b>	8	29	10	21

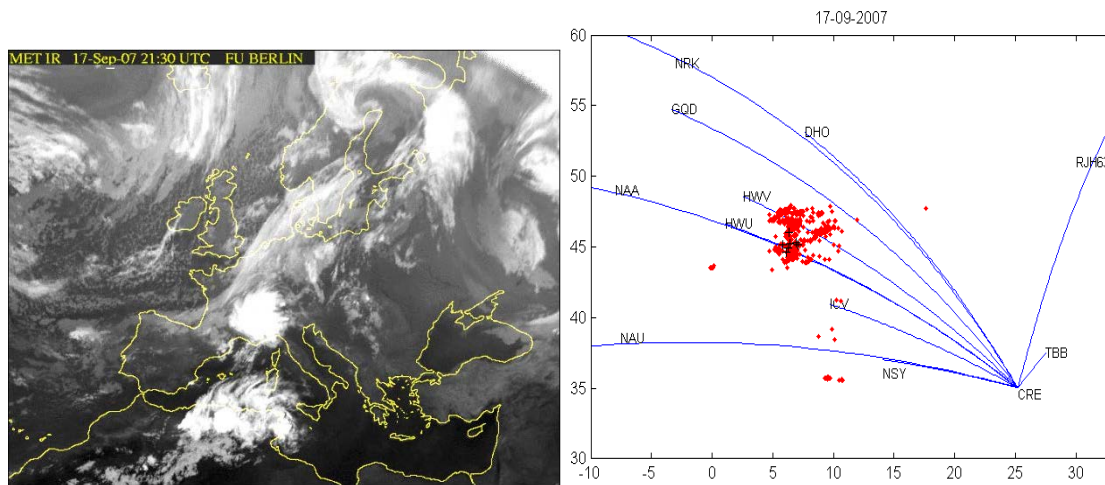
**Πίνακας 2:** Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Για κάθε καταιγίδα παρατίθενται: 1) Δορυφορικός μετεωρολογικός χάρτης της Ευρώπης που παρέχει την συνοπτική καιρική κατάσταση και την καταιγίδα που έδωσε sprites. 2) Μια συνοπτική εικόνα στο γεωγραφικό επίπεδο της προβολής των ζεύξεων GCPs πομπού-δέκτη όπως, και σε σχέση με αυτές, των θέσεων όλων των κεραυνών +CG που έλαβαν χώρα κατά την διάρκεια του συγκεκριμένου χρόνου παρατήρησης (Ο τρόπος αναπαράστασης των ζεύξεων GCP περιγράφεται στο παράρτημα 2). Εξ αυτών, αυτοί που σχετίζονται με sprites συμβολίζονται με μαύρους σταυρούς ενώ οι υπόλοιποι με κόκκινες τελείες. 3) Αναλυτικός πίνακας που παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των κεραυνών που σχετίζονται με τα καταγεγραμμένα sprites όπως και τις πλέον κοντινές αποστάσεις από υπάρχουσες ζεύξεις GCPs πομπού-δέκτη VLF. 4) Ιστόγραμμα με τις εντάσεις όλων των κεραυνών που έλαβαν χώρα κατά την διάρκεια παρατήρησης, με σκοπό την σύγκριση των χαρακτηριστικών των καταιγίδων που εξετάζουμε. 5) Οι χρονοσειρές VLF των τριών πλησιέστερων στην καταιγίδα ζεύξεων, όπως καταγράφηκαν από τον δέκτη στην Κρήτη. Τα στοιχεία αυτά συμπληρώνονται (στο τέλος του κεφαλαίου) με τα αποτελέσματα της ανάλυσης των χρονοσειρών με βάση το λογισμικό HAIL και μέσω της φασματικής ανάλυσης wavelet τα οποία και συγκρίνονται με τα οπτικά δεδομένα.

### **Συμβάντα της 17/09/2007**

Η καταιγίδα κατά την διάρκεια αυτής της νύχτας βρισκόταν σε αρκετά ευνοϊκή θέση, με τους CG κεραυνούς να βρίσκονται κοντά στις ζεύξεις GCPs πομπού-δέκτη των ισχυρών πομπών NAA και HWV. Η σύγκριση των οπτικών και HM μετρήσεων δείχνει ότι στην περίπτωση αυτή υπάρχει πλήρη συσχέτιση των οπτικών και HM μεταβατικών συμβάντων, αφού όλα τα sprites και τα δύο haloes που παρατηρήθηκαν συνοδεύονται με διαταραχές VLF τύπου early. Ορισμένες από τις διαταραχές αυτές – ειδικά για sprites με μεγάλη έκταση

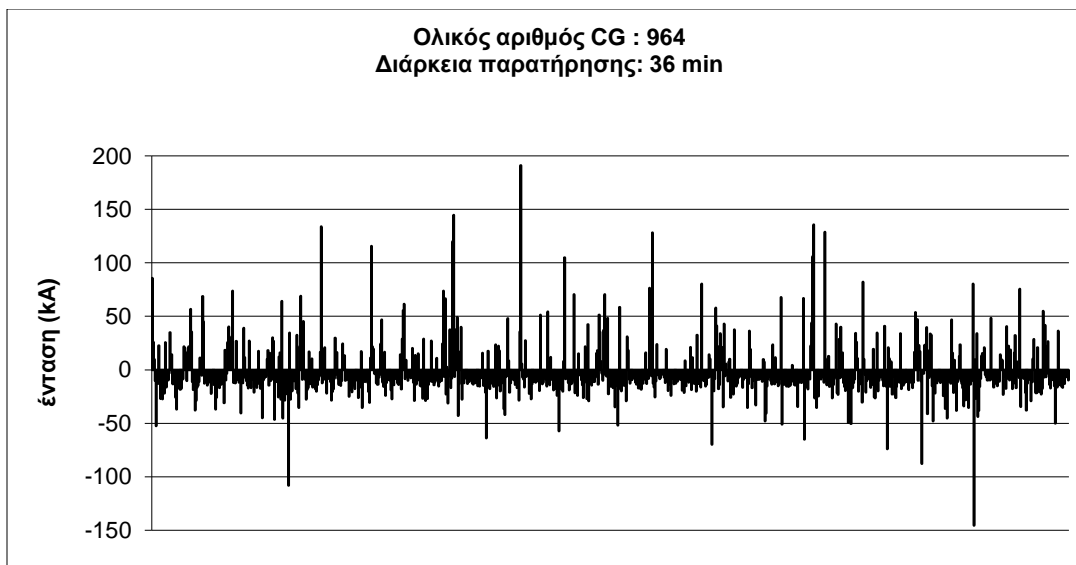
και διάχυτες δομές – είναι αρκετά μεγάλου πλάτους ενώ άλλες είναι λιγότερο ισχυρές και έχουν μικρό χρόνο επαναφοράς (~1s) και δεν είναι παρατηρήσιμες στο διάγραμμα που καλύπτει χρόνο παρατήρησης 36 λεπτών. Ο χρόνος επαναφοράς του σήματος (recovery time), καθώς και η σχετική ένταση των διαταραχών early παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.



Σχήμα 17: **α.** Θέση της καταιγίδα που παρήγαγε sprites, σε μετεωρολογικός χάρτης της Ευρώπης, **β.** Ζεύξεις GCPs, +CG κατά τη διάρκεια παρατήρησης (κόκκινες τελείες), sprites (μαύροι σταυροί)

	Sp time	relative CG time	Διαφορά χρόνου sp και cCG	Απόσταση από HWU (km)	Ένταση cCG (kA)	Ένταση early (dB) στο HWU	Χρόνος επαναφοράς (s)
1	21:25:34.696329	21:25:34.5863203	110	45	26,0	9,60	2,000
2	21:32:00.709376	21:32:01.0019737	-292	292	37,5	17,80	0,189
3	21:32:01.209502	21:32:01.1662790	-43	386	37,9	8,57	1,135
4	21:35:03.004886	-	-	-	-	5,00	0,675
5	21:41:52.148683	21:41:51.9845914	164	309	57,8	4,50	1,000
6	21:45:29.077828	-	-	-	-	8,00	0,560
7	21:50:33.153714	21:50:32.9496801	204	307	41,0	6,97	0,400
8	21:50:33.903898	-	-	-	-	8,18	0,590
9	21:51:56.466170	21:51:56.4026813	63	335	39,6	5,28	1,050
10	22:01:19.398298	22:01:19.2992914	99	371	41,7	11,00	0,510

Πίνακας 3: Αναλυτικός πίνακας χαρακτηριστικών των sprites και των αντίστοιχων ηλεκτρικών εκκενώσεων +CG

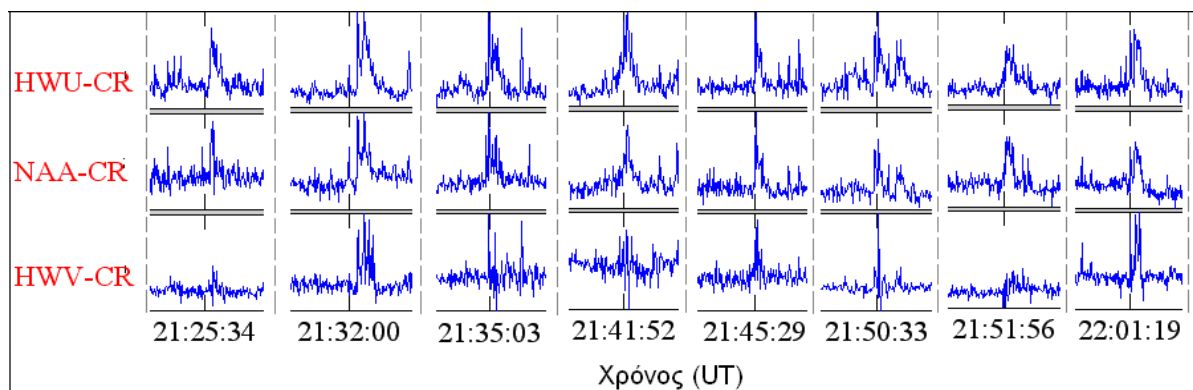


Σχήμα 18: Εντάσεις κεραυνών κατά την διάρκεια παρατήρησης.

Μέση ένταση των +CG / μέση ένταση των -CG = 2,28

Αριθμός των +CG / αριθμός των -CG = 0,28.

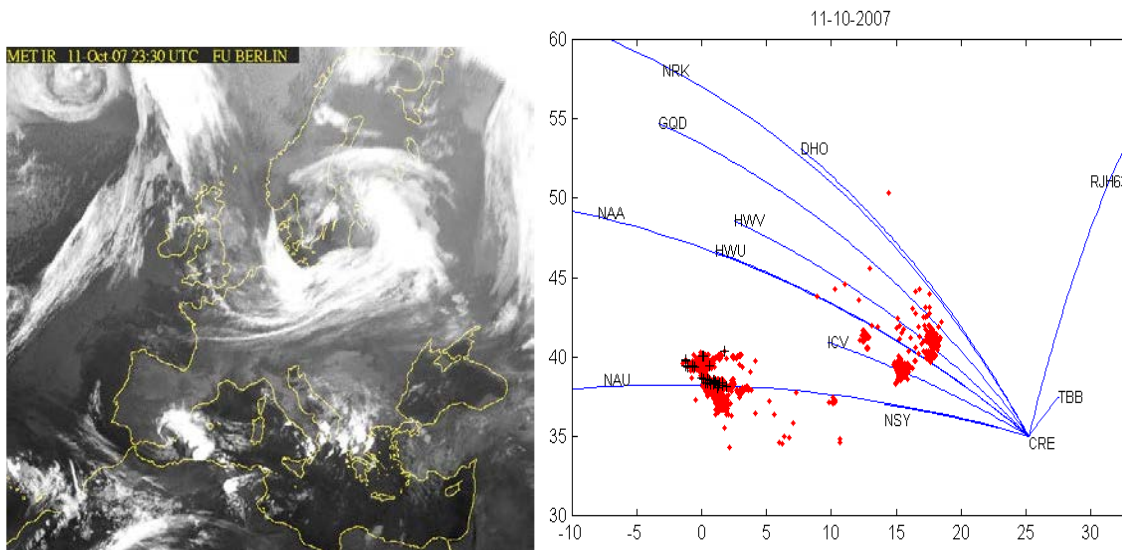
Παρακάτω (Σχ.19) φαίνονται οι διαταραχές που εμφανίζονται στις χρονοσειρές των τριών πλησιέστερων στη καταιγίδα ζεύξεων, κάθε μια από τις οποίες σχετίζεται με την παρουσία ενός sprite. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στον χρόνο (Universal Time), κάθε ‘παράθυρο’ της χρονοσειράς έχει διάρκεια ~10 s. Στον κατακόρυφο άξονα των διαγραμμάτων παριστάνεται η ένταση (dB), η οποία είναι διαφορετική για το κάθε ‘παράθυρο’ του διαγράμματος. Όπως βλέπουμε, οι διαταραχές τύπου early εμφανίζονται στη ζεύξη HWU, και κάποιες φορές και στη ζεύξη NAA.



Σχήμα 19: Χρονοσειρές VLF

## Συμβάντα της 11-12/10/2007

Την νύχτα της 11 προς 12 Οκτωβρίου καταγράφηκαν 68 sprites κατά την διάρκεια δύο ξεχωριστών καταιγίδων κατόπιν παρατηρήσεων 6,3 ωρών. Εδώ αναφερόμαστε στα 30 που έλαβαν χώρα στις 11/10, μέρα για την οποία υπήρχαν VLF μετρήσεις. Η πλειοψηφία των sprites ανήκει στην κατηγορία των column sprites, ενώ αρκετά από αυτά είναι μικρής έκτασης και χαμηλής φωτεινότητας. Κανένα από τα sprites αυτά δεν συνοδεύεται από συμβάντα τύπου early. Για την συγκεκριμένη καταιγίδα, ενδεχομένως να υπεισέρχεται κάποιος πειραματικός περιορισμός καθώς η καταιγίδα βρισκόταν κοντά σε ένα μόνο link (του νοτιότερου σταθμού NAU) το σήμα του οποίου παρουσιάζει μη αναμενόμενες περιοδικές διαταραχές στην φάση (εξαιτίας απροσδιόριστου παράγοντα ή δυσλειτουργίας), γεγονός το οποίο ενδεχομένως να ευθύνεται και για την μη παρατήρηση διαταραχών τύπου early.

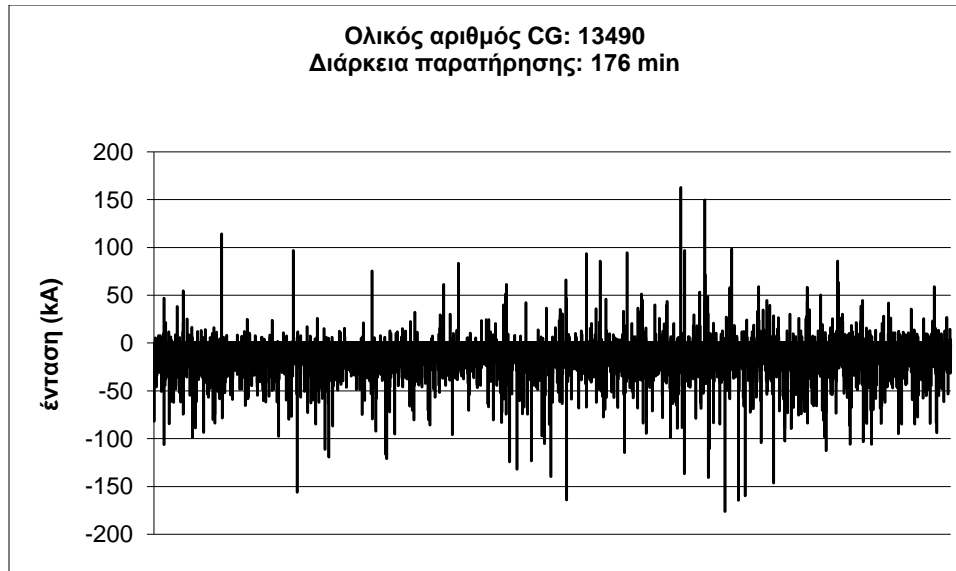


**Σχήμα 20:** **α.** Θέση της καταιγίδα που παρήγαγε sprites, σε μετεωρολογικός χάρτης της Ευρώπης, **β.** Ζεύξεις GCPs, +CG κατά τη διάρκεια παρατήρησης (κόκκινες τελείες), sprites (μαύροι σταυροί)

	sp time	relative CG time	Διαφορά χρόνου sp και cCG	Ένταση cCG (kA)	Distance from links (km)	
					NAU	NAA
1	19:50:12.419305	-	-	-	-	-
2	19:57:55.784901	-	-	-	-	-

3	21:01:22.565327	21:01:22.517919	47	48,4	11,12	834,06
4	21:08:18.127060	21:08:18.031288	95	11,4	22,24	878,55
5	21:10:57.124956	-	-	-	-	-
6	21:14:10.881506	21:14:10.756725	124	49,3	11,12	948,61
7	21:14:11.006536	-	-	-	-	-
8	21:17:46.518490	21:17:46.466202	52	121,2	1,11	880,77
9	21:17:46.851910	21:17:46.466202	385	121,2	33,36	845,18
10	21:17:47.651976	21:17:47.297652	354	67,7	22,24	851,86
11	21:22:59.221298	21:22:59.145740	75	37,3	34,47	836,29
12	21:30:53.964426	21:30:53.465778	498	24,6	23,35	898,56
13	21:37:56.861302	21:37:56.693602	167	12,5	12,23	852,97
14	22:54:09.332540	22:54:09.259134	73	10,1	100,09	869,65
15	22:58:31.939558	22:58:31.297075	642	85,7	55,60	881,88
16	23:02:09.702106	23:02:09.023604	678	94,4	202,40	407,02
17	23:06:13.721206	32:06:13.082112	639	39,8	100,09	888,55
18	23:10:13.864339	23:10:13.271824	592	10,8	240,21	627,22
19	23:13:21.786123	23:13:21.112775	673	53,5	77,85	849,63
20	23:14:04.671804	23:14:04.013192	658	149,8	136,79	822,94
21	23:17:04.966689	-	-	-	-	-
22	23:17:19.470299	32:17:18.832122	638	58,1	100,09	760,67
23	23:21:24.156216	23:21:23.672724	483	24,0	135,67	850,74
24	23:23:32.021386	-	-	-	-	-
25	23:24:12.364760	-	-	-	-	-
26	23:27:34.123329	23:27:33.789195	334	43,7	164,59	790,69
27	23:28:50.725731	23:28:50.049237	676	13,0	44,48	880,77
28	23:29:14.564997	23:29:13.885720	679	50,5	187,94	726,19
29	23:32:07.524726	23:32:07.217090	307	63,6	170,15	770,67
30	23:43:46.490414	23:43:45.844108	646	58,9	150,13	876,32

**Πίνακας 4:** Αναλυτικός πίνακας χαρακτηριστικών των sprites και των αντίστοιχων ηλεκτρικών εκκενώσεων +CG

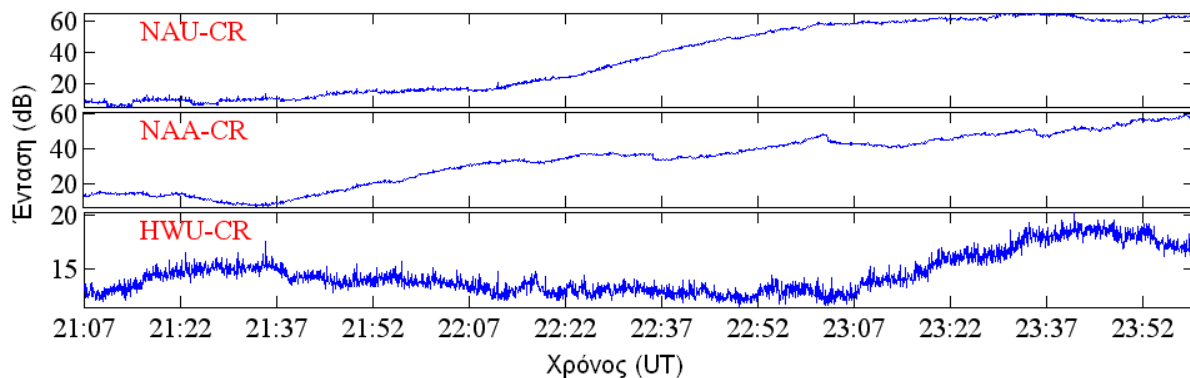


**Σχήμα 21:** Εντάσεις κεραυνών κατά την διάρκεια παρατήρησης.

Μέση ένταση των +CG/ μέση ένταση των -CG = 0,85

Αριθμός των +CG/ αριθμός των -CG = 0,08

Στο Σχήμα 22 φαίνονται οι χρονοσειρές VLF των τριών πλησιέστερων στην καταιγίδα ζεύξεων. Σε καμία από αυτές δεν εμφανίζονται διαταραχές τύπου early που να σχετίζονται με sprites.

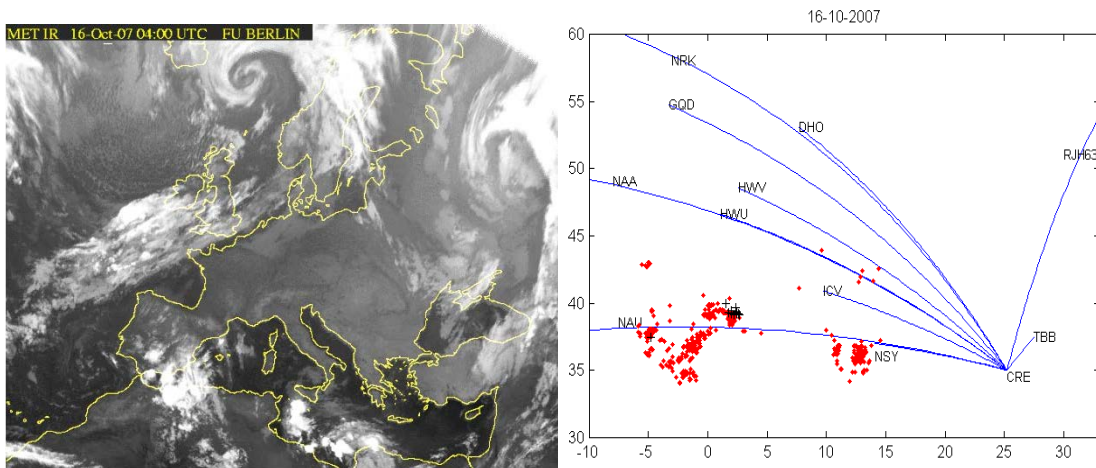


**Σχήμα 22:** Χρονοσειρές VLF

### Συμβάντα της 16/10/2007

Η καταιγίδα αυτή έχει όμοια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη ως προς την τοποθεσία, αλλά η μέση τιμή των εντάσεων των κεραυνών εδώ είναι μεγαλύτερη. Τα

περισσότερα sprites έχουν διακριτή δομή ενώ φαίνονται πιο φωτεινά και έχουν μεγαλύτερη οριζόντια έκταση. Εδώ, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, δεν παρατηρείται καμία διαταραχή τύπου early στο σήμα του πομπού NAU, το οποίο μάλλον ενισχύει την προβληματικότητα του εν λόγω σταθμού για το είδος των φαινομένων που εξετάζουμε (διαταραχές τύπου early).

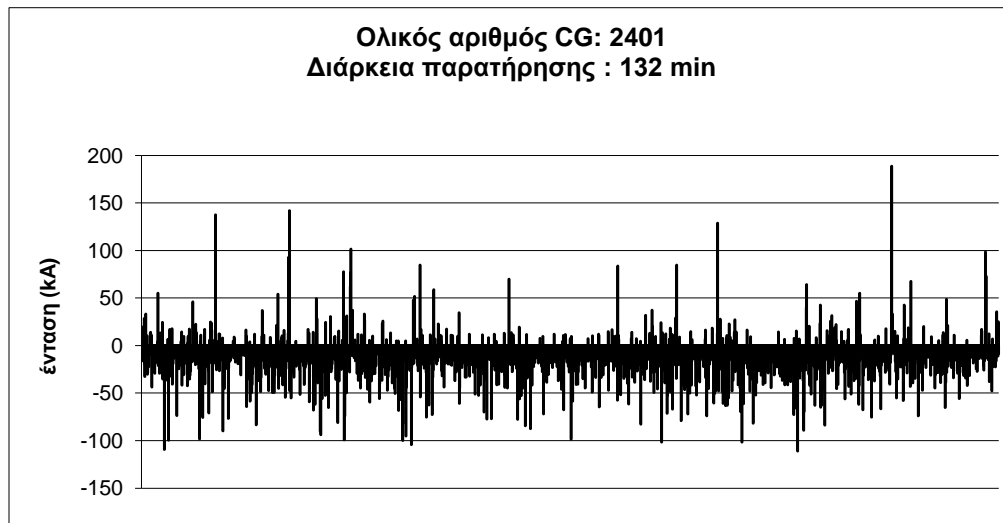


**Σχήμα 23:** α. Θέση της καταιγίδα που παρήγαγε sprites, σε μετεωρολογικός χάρτης της Ευρώπης, β. Ζεύξεις GCPs, +CG κατά τη διάρκεια παρατήρησης (κόκκινες τελείες), sprites (μαύροι σταυροί)

	sp time	relative CG time	Sprite delay (ms)	Intensity of cCG (kA)	distance from NAU (km)
1	01:45:29.753252	01:45:29.104334	648	255,6	201
2	02:14:06.513484	-	-	-	-
3	18:54:23.261747	18:54:23.3045009	-42	4,3	118
4	19:11:41.352978	19:11:41.3012591	51	142,1	127
5	19:29:45.914346	19:29:45.8140188	100	84,9	131
6	20:00:40.704549	20:00:40.6023408	602	16,9	135
7	20:01:40.177332	20:01:40.0906678	87	83,7	123
8	20:08:45.329644	20:08:45.2020354	127	29,1	107
9	20:08:45.704741	20:08:45.6536094	51	84,9	174
10	20:15:10.258758	20:15:10.2532733	5	128,9	143

<b>11</b>	20:33:32.767083	20:33:32.6953835	71	40	132
<b>12</b>	20:51:26.694751	20:51:26.6470088	47	188,6	124
<b>13</b>	21:04:28.828517	21:04:28.7642828	64	98,4	144

**Πίνακας 5:** Αναλυτικός πίνακας χαρακτηριστικών των sprites και των αντίστοιχων ηλεκτρικών εκκενώσεων +CG



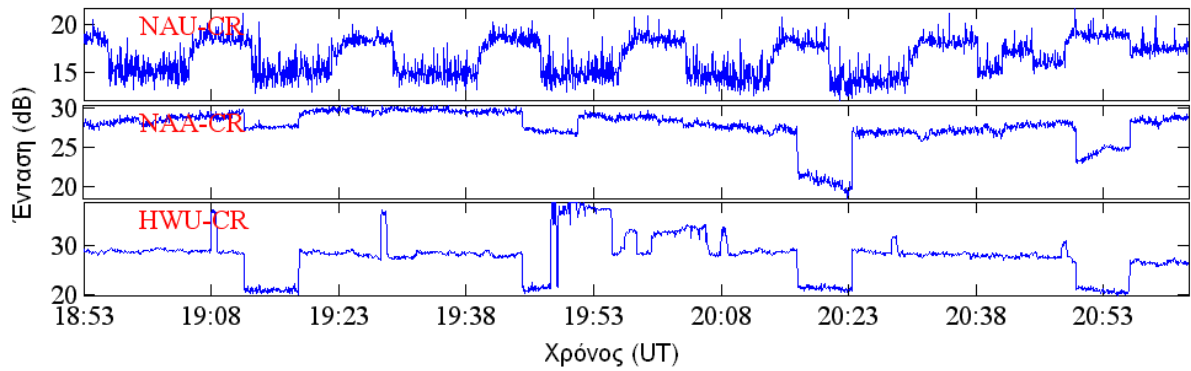
**Σχήμα 23:** Εντάσεις κεραυνών κατά την διάρκεια παρατήρησης.

Μέση ένταση των +CG / μέση ένταση των -CG = 1,01

Αριθμός των +CG /αριθμός των -CG =0,13

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 25, το σήμα του σταθμού NAU, η ζεύξη GCP του οποίου βρίσκεται δίπλα στην καταιγίδα, παρουσιάζει περιοδικές διαταραχές της έντασης. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι υπάρχει ενδεχόμενη δυσλειτουργία του πομπού. Την ίδια συμπεριφορά όμως παρουσιάζουν και οι άλλοι δύο σταθμοί των οποίων οι χρονοσειρές φαίνονται στο σχήμα. Σε αυτό το γεγονός μπορεί να οφείλεται το ότι δεν παρατηρούνται διαταραχές τύπου early.

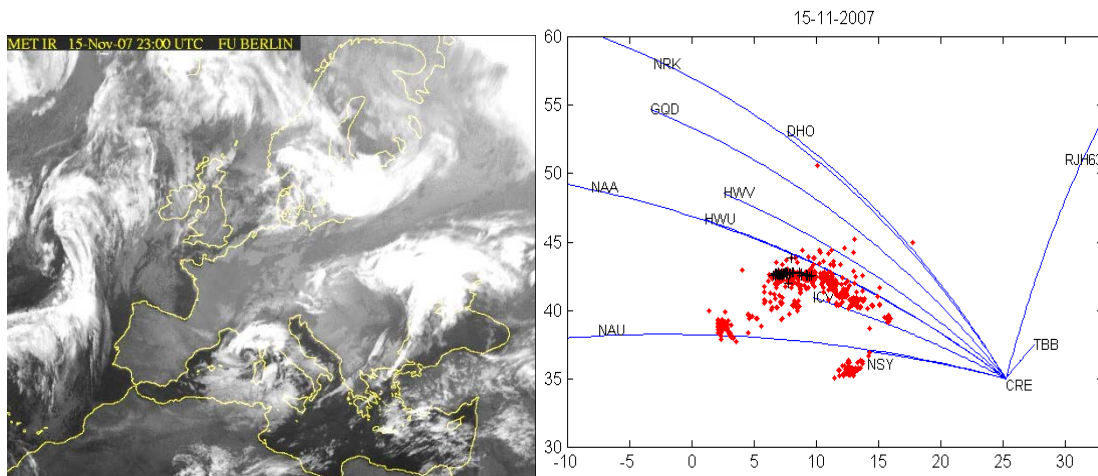




Σχήμα 25: Χρονοσειρές VLF

### Συμβάντα της 15-16/11/2007

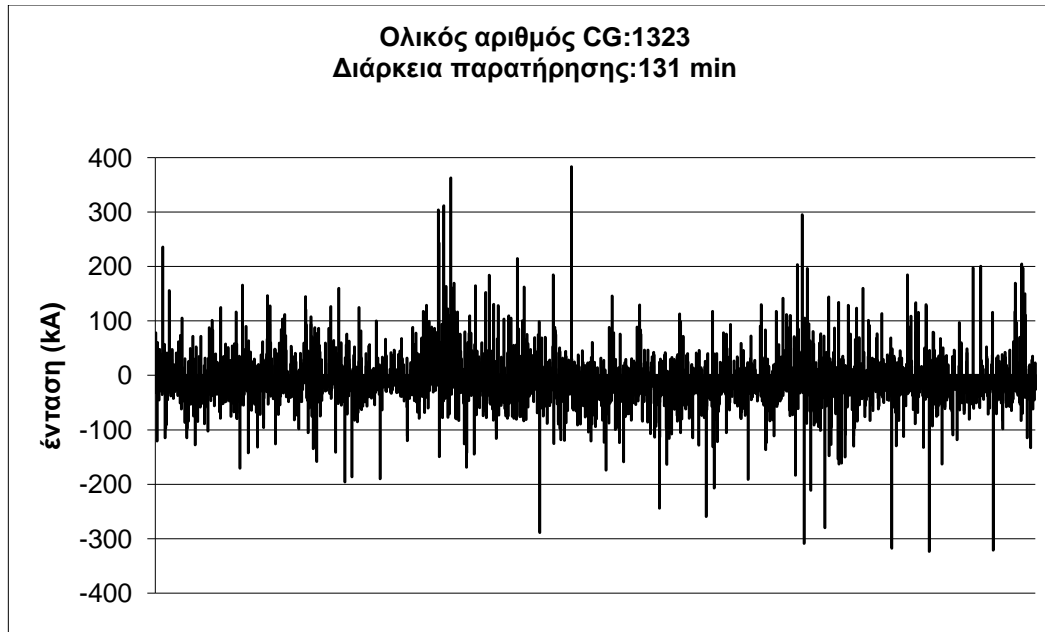
Η εν λόγω καταιγίδα βρίσκεται σε παρόμοια θέση με την πρώτη, αλλά η μέση ένταση των +CG κατά την διάρκεια παρατήρησης καθώς και η μέση ένταση των +CG που δημιουργούν sprites είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την πρώτη καταιγίδα. Τα sprites που παρατηρήθηκαν παρουσιάζουν σχετικά διάχυτες δομές φωτός. Ιδιαίτερα στο πάνω μέρος των, ενώ το καθένα από αυτά συνοδεύεται με μια διαταραχή VLF τύπου early. Οι χρόνοι επαναφοράς των early διαταραχών είναι επίσης μεγαλύτεροι από εκείνους της πρώτης καταιγίδας.



Σχήμα 26: **α.** Θέση της καταιγίδα που παρήγαγε sprites, σε μετεωρολογικός χάρτης της Ευρώπης, **β.** Ζεύξεις GCPs, +CG κατά τη διάρκεια παρατήρησης (κόκκινες τελείες), sprites (μαύροι σταυροί)

<b>15-11-2007</b>							
	<b>sp time</b>	<b>cCG time</b>	<b>Ένταση cCg (kA)</b>	<b>Distance from links (km)</b>		<b>Ένταση early (dB)</b>	<b>Χρόνος επαναφοράς(s)</b>
				<b>NAA</b>	<b>HWV</b>		
1	22:18:19.191641	22:18:19	86,7	164	363	0,28	50,4
2	22:27:38.744662	22:27:38	29,0	159	358	0,48	95,4
3	22:30:57.534614	22:30:57	56,0	176	375	0,3	90
4	22:38:38.405622	22:38:38	24,3	164	363	1,28	138
5	22:45:14.835775		-	-		0,1	0,6
6	22:57:27.306677	22:57:27	68,0	199	404	0,53	110,4
7	22:59:42.464783		-	-		1,23	82,8
8	23:01:11.389412	23:01:11	77,8	240	441	0,38	91,2
9	23:05:18.088695	23:05:18	69,2	170	448	0,25	0,5
10	23:05:58.348564	23:05:58	117,9	117	297	1,25	80,4
11	23:19:23.629409	23:19:23	243,6	202	380	0,57	31,8
12	23:25:37.784749	23:25:37	311,9	191	363	0,70	70,2
13	23:27:20.538132	23:27:20	103,4	184	351	0,40	36
14	23:36:29.150161		-	-		0,30	0,6
15	23:38:26.284933	23:38:26	362,9	183	350	0,7	27,6
<b>16/11/2007</b>							
1	00:38:11.874400	0:38:11	52,4	188	315	0,69	0,3
2	00:42:19.435259	0:42:19	69,6	172	350	0,12	0,24
3	00:42:20.393827	0:42:20	44,9	203	402	0,51	0,5
4	01:04:46.349746	1:04:46	383,6	204	403	0,38	0,42
5	03:14:00.008006		-	-		1,86	130,2

**Πίνακας 6:** Αναλυτικός πίνακας χαρακτηριστικών των sprites και των αντίστοιχων ηλεκτρικών εκκενώσεων +CG

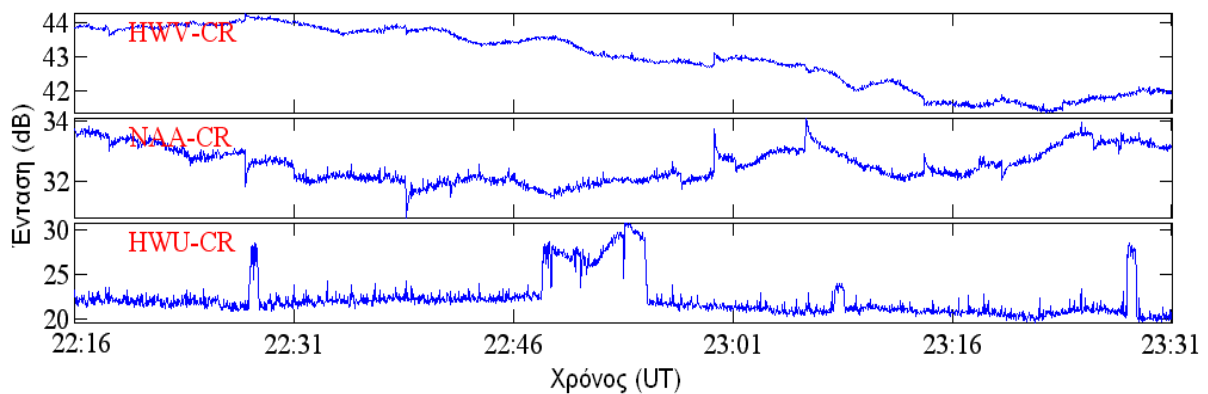


**Σχήμα 27:** Εντάσεις κεραυνών κατά την διάρκεια παρατήρησης.

Μέση ένταση των +CG / μέση ένταση των -CG = 2,05

Αριθμός των +CG / αριθμός των -CG =0,3

Κατά την διάρκεια αυτής της καταιγίδας κάθε sprite σχετίζεται με μια διαταραχή τύπου early, οι περισσότερες από τις οποίες φαίνονται στην χρονοσειρά της ζεύξης NAA στο Σχήμα 28. Στη ζεύξη του σταθμού HWU εμφανίζονται περιοδικές διαταραχές της έντασης και δεν παρατηρούνται διαταραχές early, παρ' όλο που η ζεύξη GCP αυτού του σταθμού σχεδόν ταυτίζεται με την ζεύξη του σταθμού NAA.



**Σχήμα 28:** Χρονοσειρές VLF

### 3.3 Φασματική ανάλυση χρονοσειρών με wavelets

Το δεύτερο κομμάτι της ανάλυσης των δεδομένων γίνεται με την χρήση των wavelets, για να δούμε αν υπάρχει κάποια συστηματική ιδιομορφία ή περιοδικότητα στο φάσμα των χρονοσειρών σημάτων VLF εξαιτίας των sprites, οι οποίες όμως δεν είναι ανιχνεύσιμες στην περιοχή χρόνου. Τα wavelets είναι ποιο κατάλληλα από την κλασική ανάλυση Fourier για δεδομένα που περιέχουν απότομες μεταβολές, όπως τα δεδομένα των διαταραχών early που εξετάζονται εδώ. Η φασματική ανάλυση γίνεται με τα 'Morlet wavelets', των οποίων η «συνάρτηση βάσης» είναι το γινόμενο μιας ημιτονοειδούς και μιας Γκαουσιανής συνάρτησης, και χρησιμοποιούνται ευρέως στη γεωφυσική ανάλυση χρονοσειρών (Chui,1992).

Τα wavelets είναι μαθηματικές συναρτήσεις, οι οποίες χωρίζουν τα δεδομένα (μετρήσεις) σε διαφορετικές συνιστώσες συχνοτήτων, και μελετούν κάθε συχνότητα με ένα παράθυρο ανάλυσης που ταιριάζει στην κλίμακά της. Τα wavelets αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα και έχουν χρησιμοποιηθεί στα πεδία των μαθηματικών, κβαντικής φυσικής, ηλεκτροδυναμικής και σεισμικής γεωλογίας (Torrence and Compro,1998).

Τα wavelets είναι συναρτήσεις που ικανοποιούν συγκεκριμένους μαθηματικούς περιορισμούς και χρησιμοποιούνται για την αναπαραγωγή μετρήσεων ή άλλων συναρτήσεων. Η ιδέα δεν είναι καινούρια. Προσεγγίσεις με την χρήση υπέρθεσης άλλων συναρτήσεων είναι γνωστές από τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, όταν ο Fourier ανακάλυψε ότι μπορούσε να συνθέσει περιοδικές συναρτήσεις με την υπέρθεση ημιτόνων και συνημιτόνων. Το καινούριο με τα wavelets είναι ότι η κλίμακα που χρησιμοποιούμε για να εξετάσουμε τα δεδομένα παίζει ξεχωριστό ρόλο. Επίσης, ο αριθμός συναρτήσεων βάσης δεν είναι περιορισμένος και για αυτό η ανάλυση με τα wavelets παρέχει πρόσβαση σε πληροφορίες που μπορεί να περάσουν απαρατήρητες με την ανάλυση Fourier.

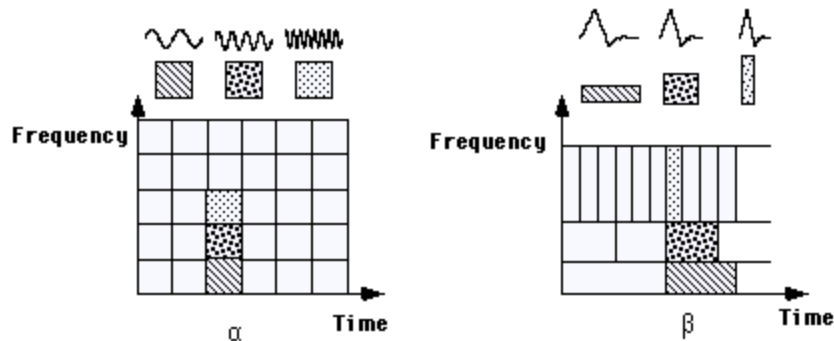
Η πιο ενδιαφέρουσα διαφορά μεταξύ των δύο μορφών μετασχηματισμού είναι ότι κάθε συνάρτηση βάσης στα wavelets είναι εντοπισμένη στον χώρο και τον χρόνο, ενώ τα ημίτονα και συνημίτονα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση Fourier εκτείνονται στο άπειρο. Για να απομονώσει κανείς ασυνέχειες του σήματος που εξετάζει χρειάζεται συναρτήσεις βάσης περιορισμένου εύρους. Ταυτόχρονα, για να γίνει λεπτομερής ανάλυση των συχνοτήτων χρειάζονται παράθυρα (χρονικά διαστήματα της χρονοσειράς) με κυμαινόμενο εύρος. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας παράθυρα (συναρτήσεις βάσης)

μικρού εύρους για ψηλές συχνότητες και μεγάλου εύρους για χαμηλές συχνότητες. Η βασική διαφορά των μεθόδων φασματικής ανάλυσης Fourier και wavelets παρίσταται στο Σχήμα 29. Το Σχήμα 29α αφορά την μεθοδολογία του μετασχηματισμού Fourier όπου το κάθε «παράθυρο» συχνότητα-χρόνου αντιστοιχεί σε σταθερό ορθογώνιο ανεξάρτητο της συχνότητας, το οποίο «ψαλιδίζει» αναγκαστικά το σήμα αν το εύρος του παλμού είναι μεγαλύτερο από αυτό του παραθύρου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 29β, το πλεονέκτημα του μετασχηματισμού wavelet είναι ότι τα παράθυρα έχουν διαφορετικό εύρος το οποίο προσαρμόζεται ανάλογα με την συχνότητα και το εύρος του σήματος.

Όπως αναφέραμε και πριν, σε αυτή την εργασία χρησιμοποιούμε τα Morlet wavelets. Για να χαρακτηριστεί η  $\psi_0(n)$  ως συνάρτηση βάσης πρέπει να ορίζεται παντού στην περιοχή χρόνου και συχνότητας, και επίσης πρέπει να ισχύει  $\langle \psi_0(n) \rangle = 0$ . Η  $\psi_0(n)$  σε αυτή την περίπτωση είναι (Torrence and Compo, 1998) :

$$\psi_0(n) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 n} e^{-n^2/2} \quad (3.1)$$

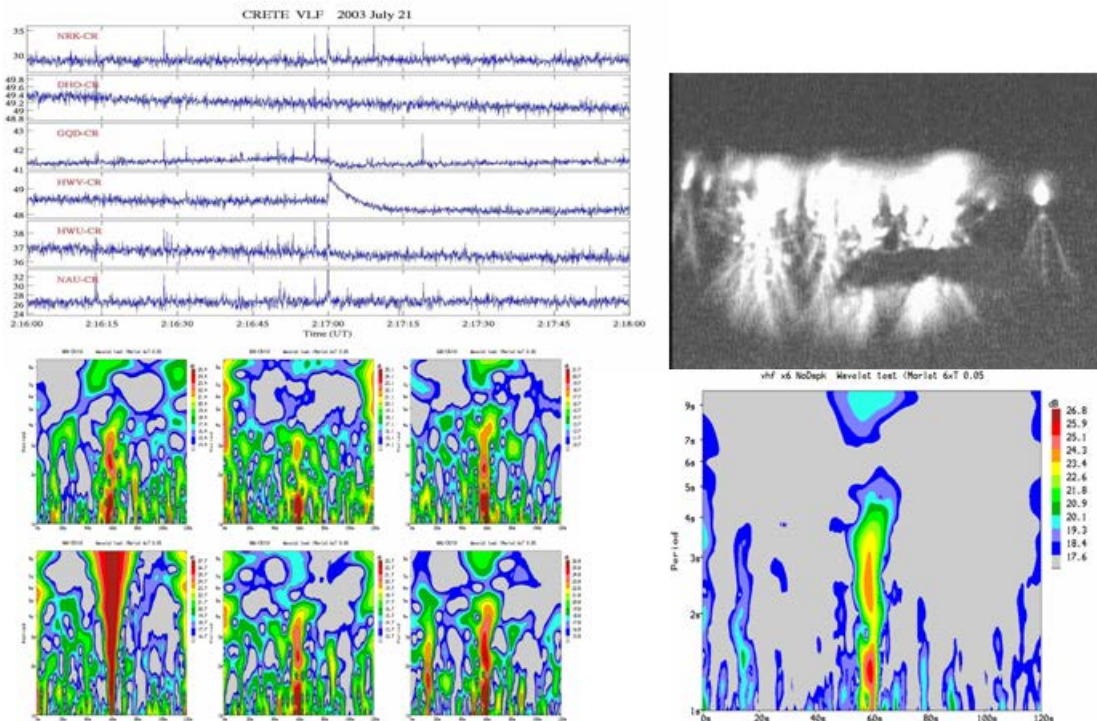
όπου  $n$  είναι μια αδιάστατη 'χρονική' παράμετρος και  $\omega_0$  = αδιάστατη συχνότητα .



Σχήμα 29: χρονικά διαστήματα της χρονοσειράς στις αναλύσεις Fourier (α) και wavelets (β)

Για τον σκοπό της εργασίας χρησιμοποιούμε έξι ταυτόχρονες χρονοσειρές για το κάθε sprite, η κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από 6001 σημεία και αντιστοιχεί σε μετρήσεις ενός σταθμού VLF. Το διάστημα δειγματοληψίας είναι για κάθε χρονοσειρά 20 ms, έτσι το παραγόμενο Φασματογράφημα Wavelet (συχνότητα- χρόνος- ένταση) είναι διάρκειας 2 λεπτών (οριζόντιος άξονας είναι ο χρόνος) στο κέντρο του οποίου λαμβάνει χώρα το sprite. Αντί της συχνότητας στον κατακόρυφο άξονα παίρνουμε την περίοδο  $\eta$

οποία μεταβάλλεται από  $\sim 0$  έως 10s. Επίσης υπολογίζουμε και το cross – wavelet φασματογράφημα, όπου συσχετίζονται τα φασματογραφήματα των σημάτων 2-6 έξι σταθμών. Οι περιοχές με τυχαίο θόρυβο αλληλοαναιρούνται, ενώ εκεί που έχουμε ταυτόχρονη διαταραχή το σήμα ενισχύεται, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει μια περιοχή του φάσματος, ή περιοδικότητα, που είναι παρούσες στα σήματα VLF όλων των σταθμών.



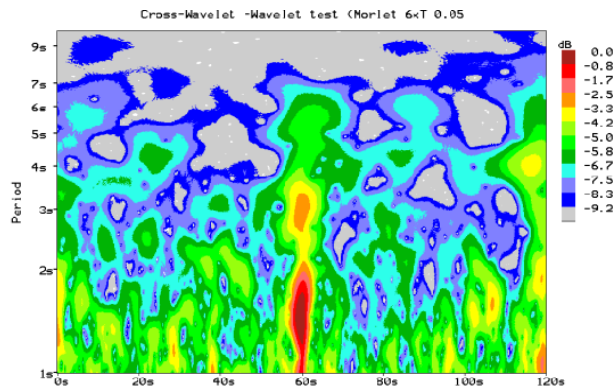
**Σχήμα 30:** Παράδειγμα sprite, ισχυρής διαταραχής τύπου early, και η μορφή της στην ανάλυση wavelet

Στο παραπάνω σχήμα (30) φαίνεται ένα παράδειγμα διαταραχής VLF τύπου early που σχετίζεται με την ταυτόχρονη εμφάνιση ενός sprite και το αντίστοιχο φασματογράφημα και δια-φασματογράφημα Wavelet. Βλέπουμε ότι η εικόνα διαφέρει από σταθμό σε σταθμό, αλλά υπάρχει ισχυρή ένταση στο φάσμα καθεμίας από τις χρονοσειρές (για κάθε σταθμό) ακριβώς εκεί που έχει εμφανιστεί το sprite, η οποία οφείλεται όχι μόνο στη διαταραχή early που είναι ισχυρή μόνο σε μία ή δύο ζεύξεις (που διέρχονται κοντά στη περιοχή του κεραυνού) αλλά και σε κάποια ασθενέστερη ‘διαταραχή’ που είναι παρούσα και στις υπόλοιπες ζεύξεις. Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται να υπάρχει μόνο σε σχέση με τους

κεραυνούς που σχετίζονται με την παραγωγή sprites και είναι χαρακτηριστική περιοδικοτήτων που υπάρχουν στο κεραυνικό σύστημα και της ακτινοβολίας που αυτό παράγει σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων στην περιοχή VLF υπό μορφή ενός sferic burst (ομάδα sferics).

### Έλεγχος με συνθετικά δεδομένα

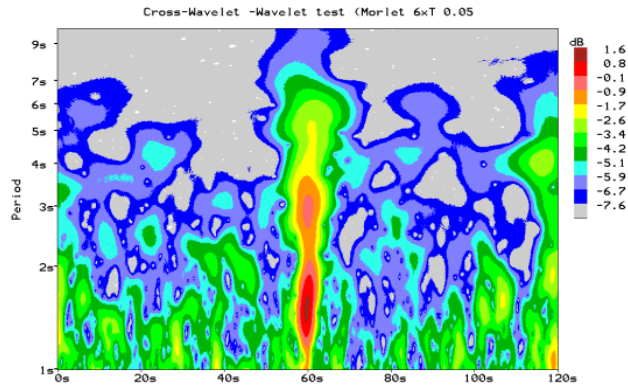
Στη συνέχεια, για να συμπεράνουμε πώς ακριβώς μεταφέρονται τα χαρακτηριστικά της διαταραχής early από την περιοχή χρόνου στο φασματογράφημα wavelet, το οποίο θα μας βοηθήσει στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσής μας, παράγουμε συνθετικές διαταραχές στην περιοχή χρόνου ίδιες με αυτές των early και στη συνέχεια παίρνουμε το φάσμα τους. Οι συνθετικές χρονοσειρές προκύπτουν από την υπέρθεση «λευκού» (=ασυσχέτιστου) θορύβου και μιας διαταραχής τύπου early με εκθετική μείωση της οποίας η αρχή (onset) τοποθετείται στο μέσον της χρονοσειράς (όπως και στα πραγματικά δεδομένα). Το αντίστοιχο διαφασματογράφημα δίνεται στο Σχήμα 31.



Σχήμα 31: Διαφασματογράφημα διαταραχής early από συνθετικά δεδομένα

Στη περίπτωση αυτή όντως βρίσκουμε ότι η συσχέτιση στο διαφασματογράφημα των έξι εικονικών χρονοσειρών δίνει μια διακριτή φασματική διαταραχή μεγάλης έντασης με περιοδικότητες λίγων δευτερολέπτων στο κέντρο του διαστήματος, όπως και στην περίπτωση των πραγματικών δεδομένων.

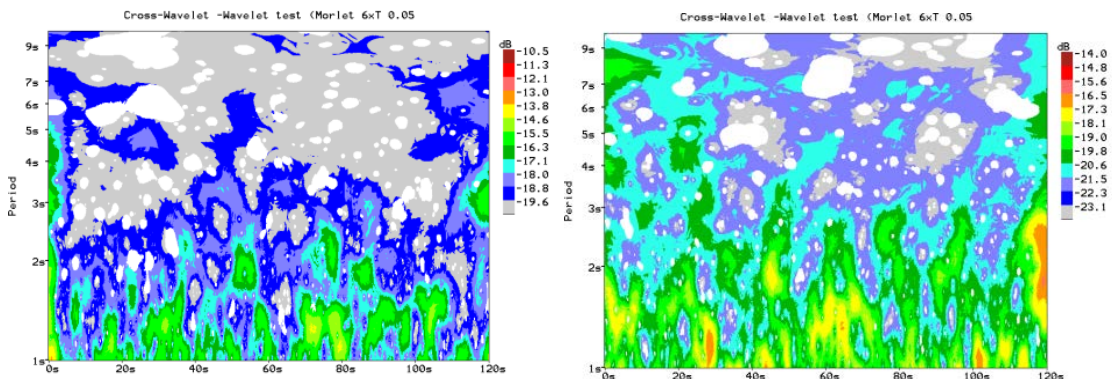
Αν στην εκθετικής μορφής διαταραχή προσθέσουμε και μερικά sferics, η υπέρθεση θα έχει την μορφή του Σχήματος 32:



Σχήμα 32: Διαφασματογράφημα διαταραχής *early* σε συνδυασμό μια ομάδα *sferics*.

Με την προσθήκη των *sferics* η περιοδικότητα λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή, αλλά και η ένταση παρουσιάζει αύξηση.

Στη συνέχεια εξετάζουμε δύο ισχυρά bursts of *sferics*, οι οποίες δεν ακολουθούνται από διαταραχή τύπου *early*, και που οφείλονται σε μια θετική και μια αρνητική ισχυρή ηλεκτρική εκκένωση, τα οποία βρίσκονται κοντά στις ζεύξεις των σταθμών NAA, HWU και HWV, και δεν δημιουργούν *sprites*. Στην περίπτωση αυτή, σε κανέναν σταθμό δεν παρατηρούμε την χαρακτηριστική εικόνα που δημιουργούν τα *sprites*, και οι εικόνες υπέρθεσης έχουν την παρακάτω μορφή (Σχήμα 33):



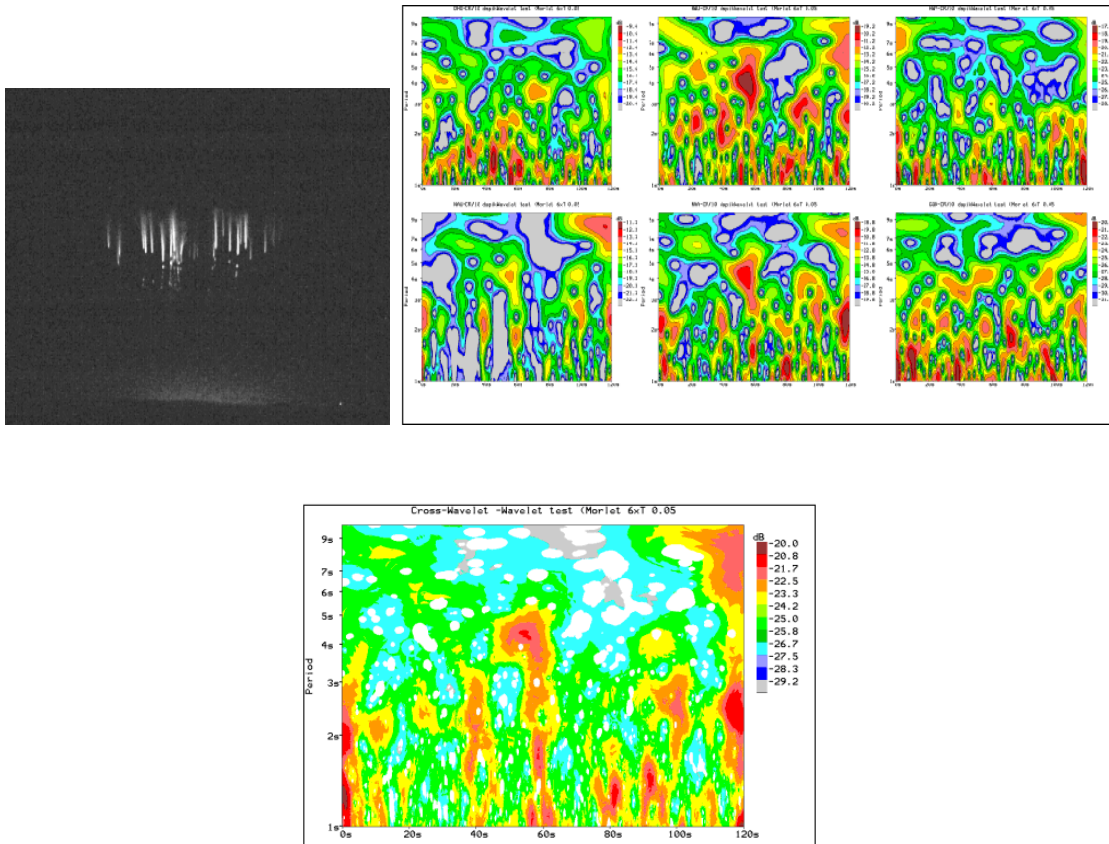
Σχήμα 33: Θετικό burst (α), αρνητικό burst (β)

Το συμπέρασμα είναι ότι ένα burst που δεν συνοδεύεται είτε από διαταραχή τύπου *early* είτε από *sprite* (με ή χωρίς ανιχνεύσιμη διαταραχή τύπου *early*), δεν έχει την χαρακτηριστική μορφή στα *wavelets*. Είναι ενδιαφέρον το ότι το 93% των περιπτώσεων (όπως αναφέρεται και στον πίνακα 1) με αυτή την ανάλυση, η διαταραχή είναι φανερή



τουλάχιστον σε μια από τις ζεύξεις, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η χαρακτηριστική διαταραχή είναι παρούσα και σε ζεύξεις που βρίσκονται πολύ μακριά από το sprite. Ακόμα και στις περιπτώσεις που το sprite δεν προκαλεί διαταραχή early σε κανέναν από τις ζεύξεις, βρίσκουμε την χαρακτηριστική αύξηση της περιοδικότητας στο κέντρο του διαστήματος ανάλυσης. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι τα sprites σχεδόν πάντα προκαλούν διαταραχές early, οι οποίες όμως μπορεί να έχουν τόσο μικρή ένταση και χρόνο επαναφοράς ώστε να μην είναι δυνατός ο διαχωρισμός τους από τον ασυσχέτιστο θόρυβο. Εναλλακτικά, η χαρακτηριστική αυτή διαταραχή οφείλεται σε συγκεκριμένη εκπομπή HM ακτινοβολίας από το μητρικό σύστημα κεραυνών που οδηγεί σε sprites το οποίο έχει μια χαρακτηριστική δομή στο χρόνο διαφορετική αυτών που δεν καταλήγουν σε sprites.

Ένα τυπικό παράδειγμα sprite χωρίς διαταραχή early φαίνεται στο Σχήμα 34. Βλέπουμε την αναπαράσταση έξι σταθμών και το διαφασματογράφημα αυτών όπου είναι φανερή η χαρακτηριστική μορφή διαταραχής με υψηλή περιοδικότητα στο μέσο του διαστήματος παρατήρησης.



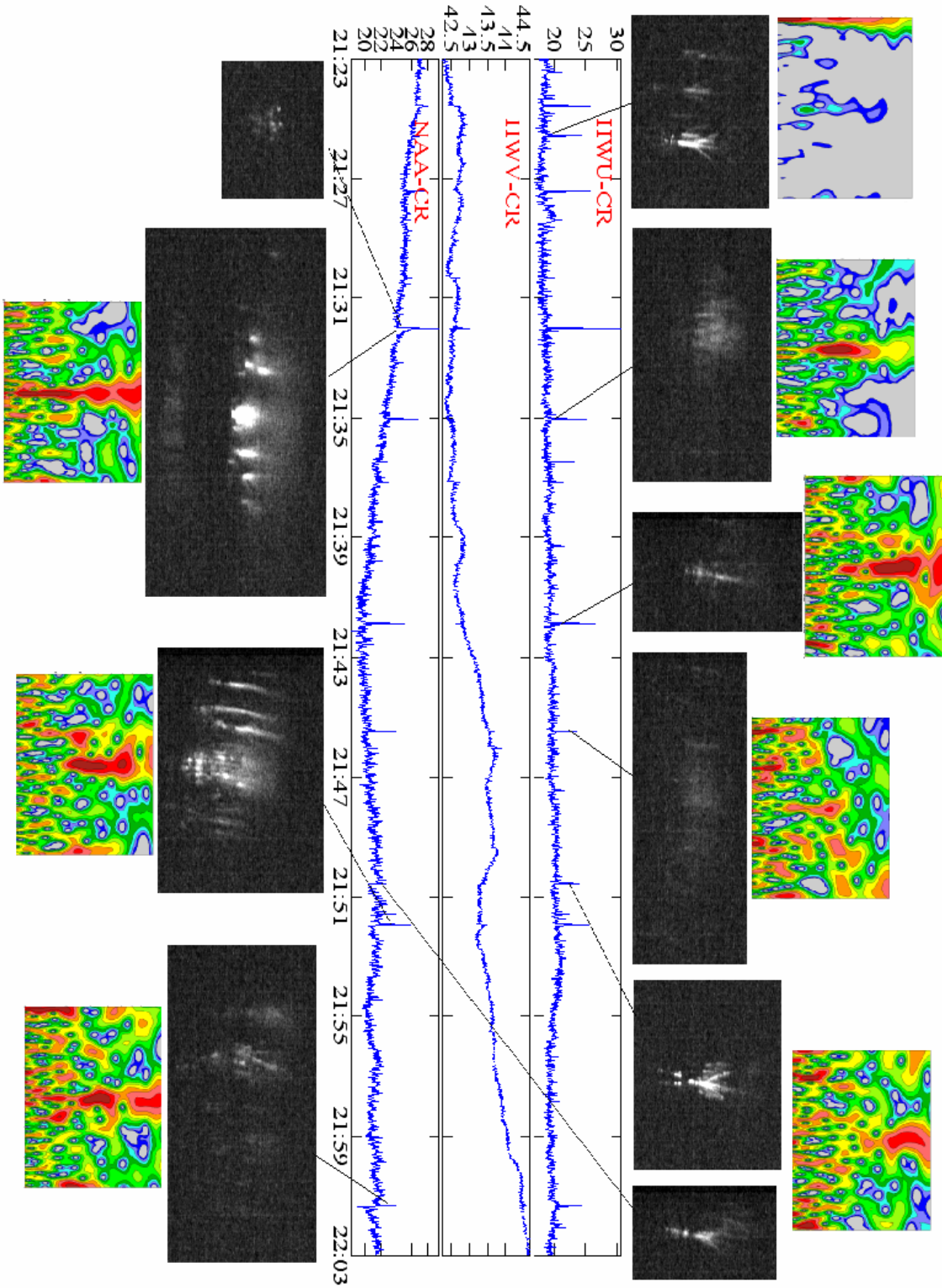
**Σχήμα 34:** Οπτική εικόνα, φασματογραφήματα χρονοσειρών έξι ζεύξεων και το διαφασματογράφημά τους ενός sprite το οποίο δεν συνοδεύεται από διαταραχή τύπου early.

Οι αποστάσεις του sprite από τις παραπάνω ζεύξεις είναι (από πάνω και αριστερά):

DHO: 1615 km, HWU: 840 km, HWV: 1040 km, NAU: 36 km, NAA: 839 km, GQD: 1412 km. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες μια διαταραχή τύπου early εμφανίζεται αν το sprite λαμβάνει χώρα σε μια απόσταση το πολύ 250 km από την ζεύξη, άρα η μέθοδος ανάλυσης με τα wavelets αποδεικνύεται πιο ευαίσθητη.

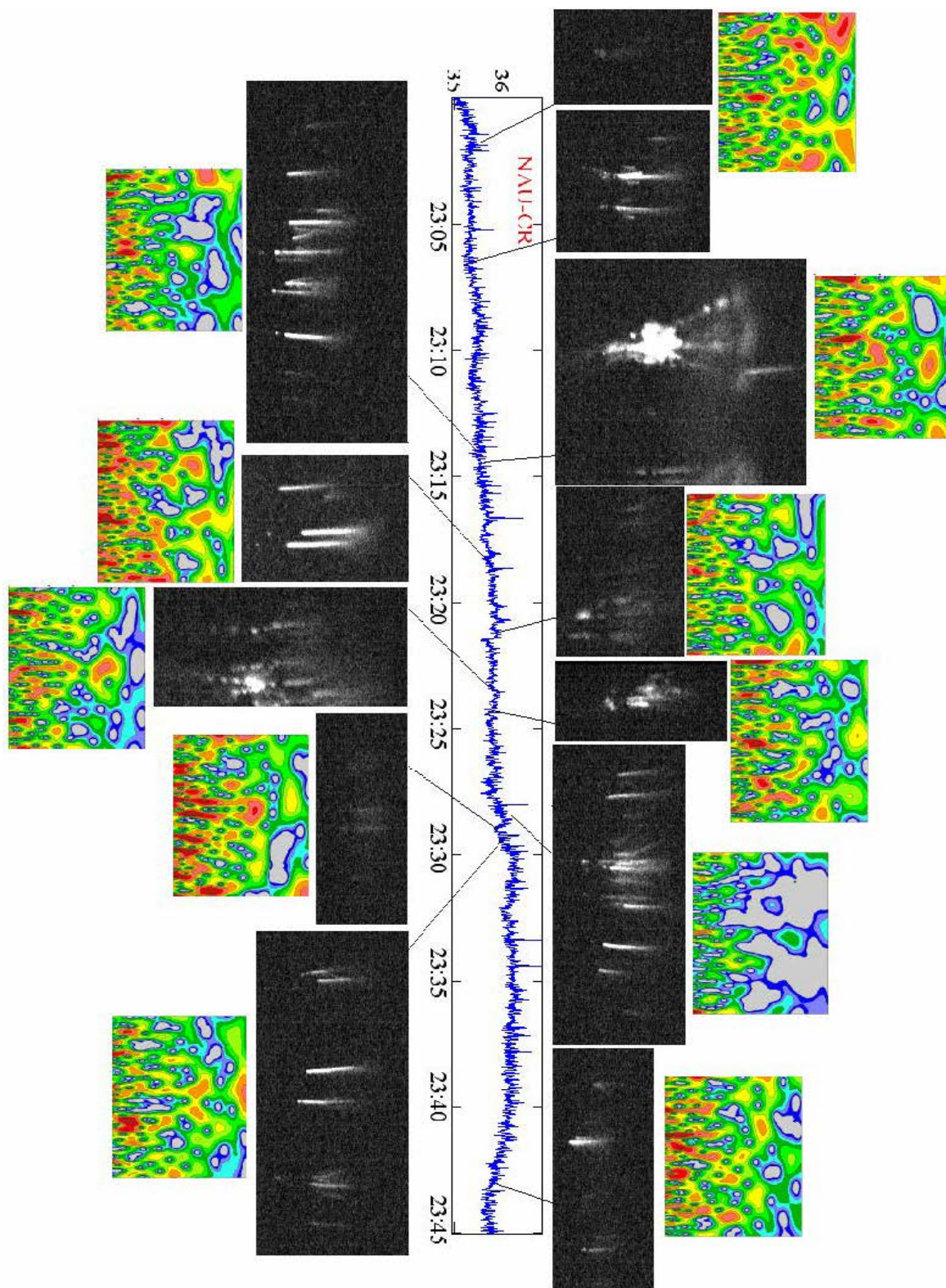
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με βάση το λογισμικό HAIL και μέσω της φασματικής ανάλυσης wavelet τα οποία και συγκρίνονται με τα οπτικά δεδομένα (Σχήματα 35,36,37,38).

17/09/07



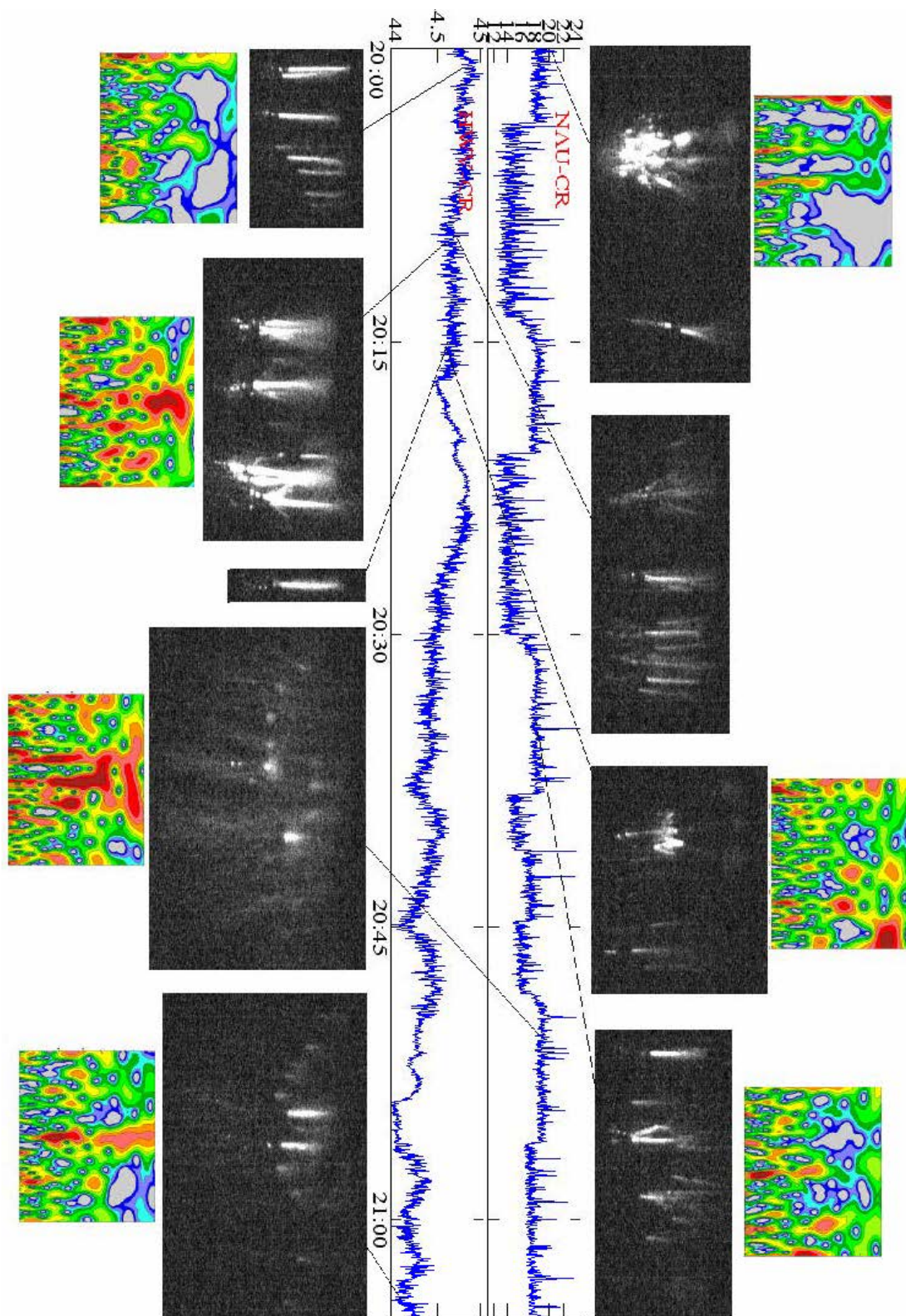
Σχήμα 35

11/10/07



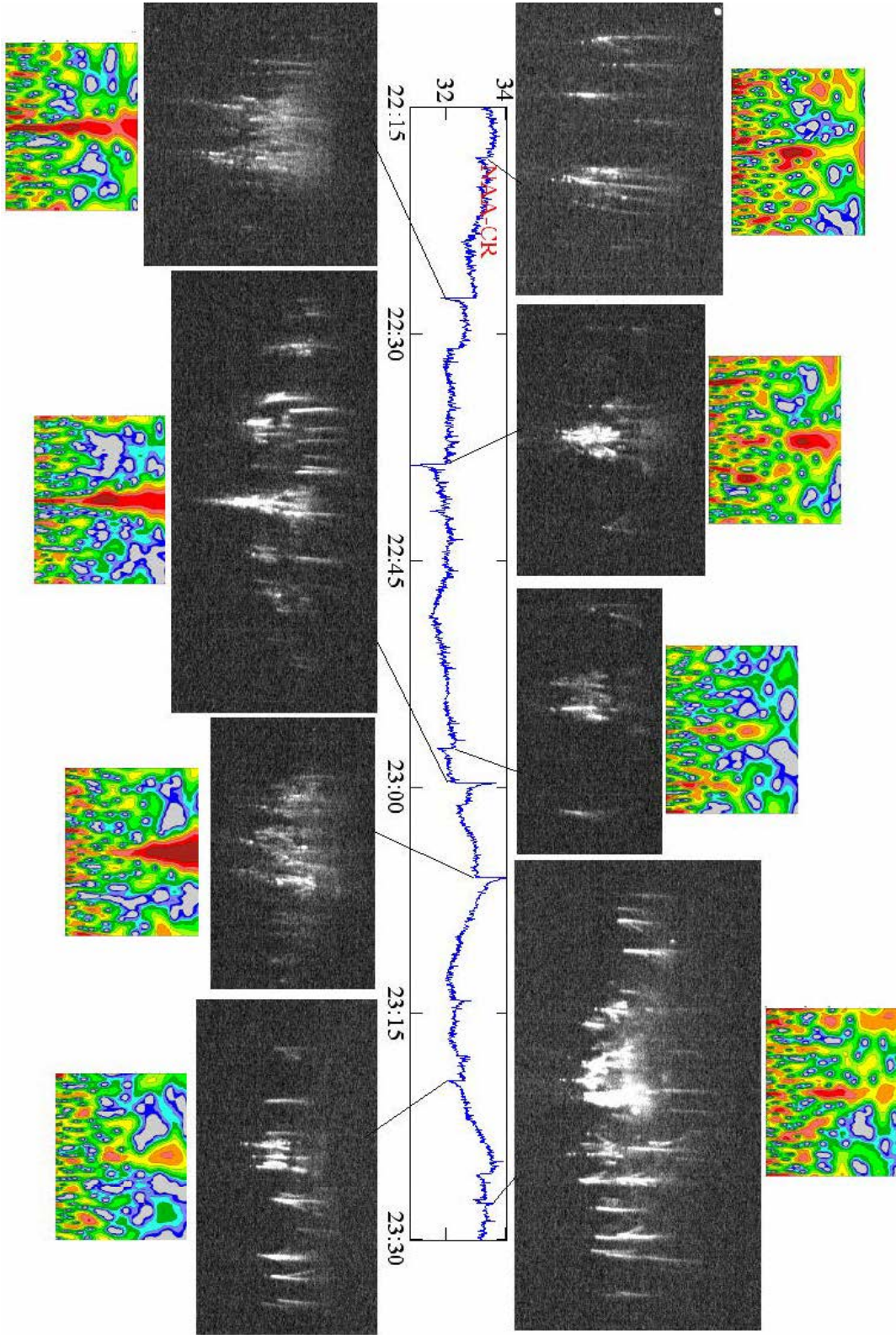
Σχήμα 36

16/10/07



Σχήμα 37

15/11/07



Σχήμα 38

# Κεφάλαιο 4: Συζήτηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

## 4.1 Συσχέτιση των sprites και των early διαταραχών στις τέσσερις καταιγίδες:

Η θέση της καταιγίδας της 11/10-2007 ήταν νότια, πάνω από την θάλασσα ώστε να καλύπτεται μόνο από τη ζεύξη NAU της οποίας ο πομπός βρίσκεται στο Puerto Rico. Κανένα από τα sprites της εν λόγω καταιγίδας δεν σχετίζεται με διαταραχές τύπου early στο σήμα του σταθμού NAU. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στην συγκεκριμένη ζεύξη και τους κανονικούς τρόπους διάδοσης της (normal propagation modes) οι οποίοι ενδεχομένως να μην διέρχονται μέσω της περιοχής της διαταραχής, είτε στην σχετικά υψηλή συχνότητα του σταθμού (40.75 kHz), ίσως δε και στην σχετικά μικρή ένταση εκπομπής του (100 kW) ενώ τέλος ρόλο μπορεί να παίζουν και τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων sprites.

Όπως βλέπουμε από το Σχήμα 36, τα περισσότερα sprites ανήκουν στην κατηγορία των c-sprites και αποτελούνται από συστάδες ευδιάκριτων κολώνων μικρής οριζόντιας έκτασης. Αυτό σημαίνει ότι οι περιοχές ιονισμού είναι εντοπισμένες και όχι διάχυτες, το οποίο, με βάση την θεωρία, δεν ευνοεί την σκέδαση των διερχόμενων VLF κυμάτων στην προς τα εμπρός κατεύθυνση (forward scattering). Από την άλλη, ο χρόνος καθυστέρησης των sprites από τις +CG στις οποίες οφείλονται (βλέπε Πίνακα 3) είναι πολύ μεγαλύτερος από τους χρόνους που συνήθως αναφέρει η βιβλιογραφία (π.χ. Mika, 2007). Αυτό μας δίνει μια χρήσιμη πληροφορία για το μέγιστο ύψος όπου μπορεί να έλαβε χώρα το κάθε sprite: στο σχήμα 12β βλέπουμε ότι για 600ms καθυστέρηση μετά την ηλεκτρική εκκένωση (καμπύλη 3) το μέγιστο ύψος που η τιμή του πεδίου QE ξεπερνά την τιμή του πεδίου κατάρρευσης είναι ~ 55km, απ' όπου και ξεκινάει η δημιουργία των sprites, που ενδεχομένως συνεπάγεται ότι το συγκεκριμένο sprite να παράγεται-εντοπίζεται σε χαμηλότερο ύψος.

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να ξέρουμε το υψόμετρο ανάκλασης των VLF κυμάτων του σταθμού NAU, η γραμμή ζεύξης (GCP) του οποίου περνά από την καταιγίδα.

Ο σταθμός αυτός εκπέμπει στα 40,75 kHz, και όπως εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε από τον τύπο (1.1) το υψόμετρο ανάκλασης κυμάτων αυτής της συχνότητας είναι ~90 km που είναι αρκετά ψηλότερα από το ύψος δημιουργίας των sprites. Ενδεχομένως λοιπόν στην περίπτωση αυτή να μη αναμένεται να δούμε διαταραχές τύπου early για τα sprites που έχουν σχετικά μεγάλο χρόνο καθυστέρησης και χαμηλό ύψος εμφάνισης. Το τελευταίο σημαίνει επίσης ότι ο χρόνος επαναφοράς του σήματος της διαταραχής (recovery time) μπορεί, σύμφωνα με τους υπολογισμούς προσομοίωσης της Mika (2007), να είναι τόσο μικρός ώστε να μην είναι ανιχνεύσιμος στη μεταβολή του σήματος (δηλαδή ο εντοπισμός στο σήμα της διαταραχής early είναι δύσκολος).

Η καταιγίδα της 16/10-2007 βρίσκεται σχεδόν στην ίδια θέση με την προηγούμενη όπου επίσης δεν παρατηρούνται διαταραχές τύπου early που να σχετίζονται με sprites. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το σήμα του σταθμού NAU παρουσιάζει περιοδικές διαταραχές φάσης και έντασης όπως φαίνεται στο Σχήμα 37 που σημαίνει ότι υπάρχει ενδεχόμενη δυσλειτουργία του πομπού. Το 50% των sprites που παρατηρούνται αυτή την μέρα ανήκουν στην κατηγορία των c-sprites, ενώ τα υπόλοιπα φαίνονται να έχουν πιο διάχυτες δομές, χωρίς να είναι δυνατή η ακριβής κατηγοριοποίησή τους. Οι παραπάνω λόγοι (που αναφέρθηκαν για την καταιγίδα 11/10-2007 όταν δεν είχαμε ανίχνευση συμβάντων early) μπορεί να ισχύουν και στην εν λόγω περίπτωση.

Η καταιγίδα της 17/09-2007 βρίσκεται σε ευνοϊκή θέση, από την άποψη ότι βρίσκεται κοντά σε ζεύξεις σταθμών (και πλησίον αυτών) με ισχυρή εκπομπή όπως οι HWU και HWV. Κατά τη διάρκεια αυτής της μέρας όλα τα sprites σχετίζονται με διαταραχές τύπου early. Οι διαταραχές έχουν μεγάλες εντάσεις και μικρό χρόνο επαναφοράς (0,2 – 2 s). Τα δύο αυτά μεγέθη, όπως δείχνει το Σχήμα 35, δεν φαίνεται να σχετίζονται μεταξύ τους.

Κατά την διάρκεια της καταιγίδας της 15/11 το κάθε sprite συνοδεύεται από διαταραχή τύπου early, οι οποίες έχουν μεγαλύτερους χρόνους επαναφοράς από τις διαταραχές της προηγούμενης καταιγίδας, αλλά οι εντάσεις τους είναι μικρότερες. Παρατηρούμε (Σχήμα 38) ότι τα sprites αυτή τη μέρα έχουν διάχυτες δομές και κατά μέσο όρο μεγαλύτερες οριζόντιες εκτάσεις από τις τρεις προηγούμενες περιπτώσεις. Οι διαταραχές early αυτής της καταιγίδας συνοδεύονται από εντονότερη δραστηριότητα sferics σε σχέση με τις διαταραχές early της 17/09. Αυτό διαπιστώνεται και από τις ισχυρές περιοδικότητες στις



εικόνες της ανάλυσης (φασματογραφήματα) με wavelets. Το παραπάνω αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο και από την ανάλυση συνθετικών χρονοσειρών.

#### 4.2 Διαφορές της ηλεκτρικής δραστηριότητας των τεσσάρων καταιγίδων:

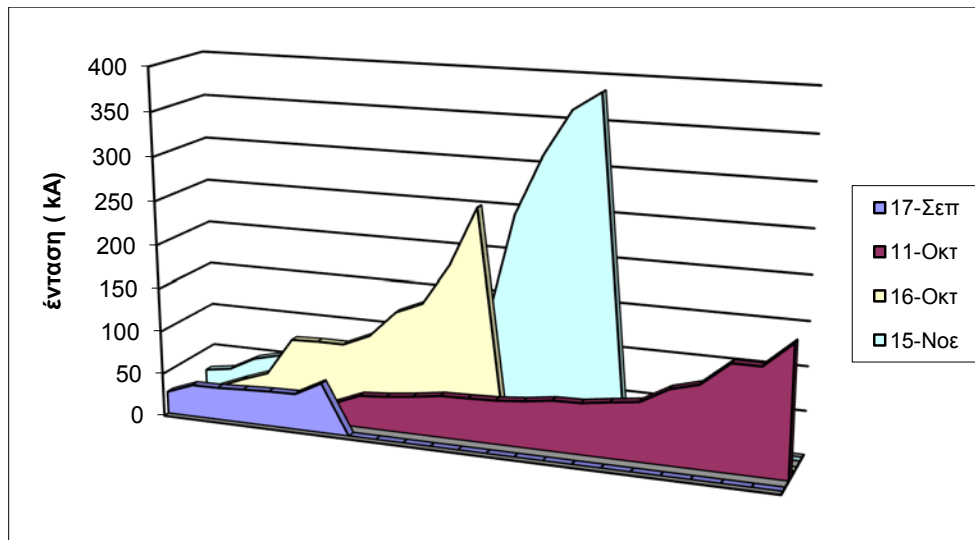
Η πρώτη, και πολύ σημαντική, διαφορά των δύο καταιγίδων που παρουσιάζουν 100% συσχέτιση μεταξύ διαταραχών τύπου early και sprites και εκείνων που παρουσιάζουν 0% συσχέτιση είναι η γεωγραφική τους θέση. Το γεγονός ότι μόνο ένας σταθμός καλύπτει τις καταιγίδες αυτές αποτελεί ένα σημαντικό πειραματικό περιορισμό για την εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων καθόσον δεν επιτρέπει συγκρίσεις. Η δεύτερη διαφορά αφορά τον αριθμό και την ένταση των +CG σε σχέση με τα -CG κατά την διάρκεια παρατήρησης (Πίνακας 6). Κατά την διάρκεια των καταιγίδων που παρατηρούμε διαταραχές early, ο λόγος του αριθμού των εκκενώσεων +CG προς τον αριθμό των εκκενώσεων -CG είναι πολύ μεγαλύτερος από εκείνων των καταιγίδων που δεν παρατηρούνται αυτές οι διαταραχές. Επίσης, ο λόγος των μέσων εντάσεων των +CG προς τις μέσες εντάσεις των -CG είναι διπλάσιος για τις καταιγίδες όπου παρατηρούμε διαταραχές τύπου early σε σχέση με τους αντίστοιχους αριθμούς των καταιγίδων χωρίς τις διαταραχές αυτές.

	Αριθμός +CG/αριθμός -CG	ένταση +CG/ ένταση -CG
17/09	0,28	2,28
11/10	0,08	0,85
16/10	0,13	1,01
15/11	0,3	2,05

**Πίνακας 6:** Λόγος αριθμού και έντασης των +CG προς -CG στις τέσσερις καταιγίδες

Οι τιμές των εντάσεων των μεμονωμένων κεραυνών που παράγουν sprites όμως δεν έχουν σχέση με την ύπαρξη των διαταραχών early, όπως άλλωστε είναι γνωστό και από προηγούμενες μελέτες (π.χ. βλέπε Mika, 2007). Στο παρακάτω Σχήμα (39) φαίνονται αυτές

οι εντάσεις (σε αύξουσα σειρά για να είναι πιο εύκολος ο διαχωρισμός τους) για την κάθε καταιγίδα ξεχωριστά. Η μέση τιμή αυτών των κεραυνών λαμβάνει την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή για τις δύο καταιγίδες όπου παρατηρούνται διαταραχές early, πράγμα το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ένταση των κεραυνών που παράγουν sprites δεν παίζει αποφασιστικό ρόλο.



**Σχήμα 39:** εντάσεις των κεραυνών που προκαλούν τα sprites στις τέσσερις καταιγίδες

#### 4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης φασματογραμμάτων wavelets και συμπεράσματα

Στις περιπτώσεις που έχουμε διαταραχές τύπου early παρατηρούμε μια αυξημένη χαρακτηριστική ένταση (peak) στο φάσμα που συστήνει την ύπαρξη έντονης κεραυνικής πολλαπλότητας που δημιουργεί burst of sferics με υψηλή συχνότητα επανάληψης. Αυτό φαίνεται να είναι εντονότερο για την περίπτωση συμβάντων early με μεγαλύτερους χρόνους επαναφοράς καθώς συνεπάγεται ότι συνοδεύονται με κάποια περιοδικότητα στα διαδοχικά sferics. Η ερμηνεία της παρατήρησης αυτής δεν είναι εύκολη με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία, αλλά σίγουρα είναι σημαντική και ενδιαφέρουσα.

Στις περιπτώσεις που τα sprites δεν συνοδεύονται με διαταραχές early παρατηρούμε και πάλι μια κάποια φασματική αύξηση στην περιοδικότητα στο κέντρο του διαστήματος

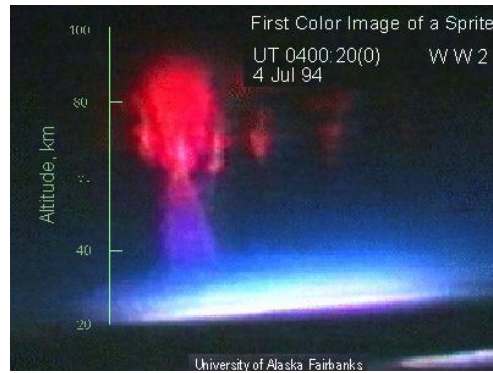
ανάλυσης το οποίο συμπίπτει με την εμφάνιση του sprite. Στην περίπτωση της καταιγίδας της 11/10 η αύξηση αυτή είναι μικρότερη και λιγότερο ευκρινής σε σχέση με εκείνη της 16/10, όπου τα sprites είναι μεγαλύτερα σε έκταση, πιο διάχυτα και με μεγαλύτερη ένταση φωτεινότητας. Παρά τις διαφορές που μπορούμε να προσδιορίσουμε μεταξύ των δύο αυτών περιπτώσεων, που αφορούν την μέση ένταση των κεραυνών που προκαλούν τα sprites και τα χαρακτηριστικά των sprites, οι διαταραχές early απουσιάζουν και στις δύο περιπτώσεις.

Στη περίπτωση ύπαρξης διαταραχής early, η χαρακτηριστική εικόνα από την ανάλυση με wavelets που μόλις περιγράψαμε, εκτός από τους σταθμούς όπου διακρίνεται η διαταραχή και για τους οποίους ήταν αναμενόμενο, εμφανίζεται και σε άλλες ζεύξεις (GCPs) σταθμών που περνούν αρκετά μακριά (>250 km) από την αναμενόμενη περιοχή εμφάνισης του sprite με βάση την θέση του αντίστοιχου κεραυνού +CG και της θέσης της καταιγίδας. Συνεπώς, μπορούμε να υποθέσουμε ότι κάποια μορφή διαταραχών που δεν είναι παρατηρήσιμη μέσω της ανάλυσης στην περιοχή χρόνου είναι όντως ανιχνεύσιμη στα φασματογραφήματα wavelets. Αυτό καθιστά τα wavelets μια πιο ευαίσθητη τεχνική για τον εντοπισμό μιας χαρακτηριστικής δραστηριότητας VLF που συνοδεύει την εμφάνιση των sprites. Η ερμηνεία ενδεχομένως εδώ να οφείλεται στο ότι τα sprites που δεν συνοδεύονται (για αγνώστους ακόμη λόγους) από κάποια σαφή διαταραχή τύπου early, σχετίζονται με μια συγκεκριμένη μορφή 'θορύβου' VLF που υποδεικνύει μια ιδιόμορφη κεραυνική δραστηριότητα που φαίνεται να εμπεριέχει ένα σύστημα ενδονεφικών εκκενώσεων είτε κεραυνικής πολλαπλότητας CG (οι οποίες παράγουν δραστηριότητα sferics στα VLF). Αυτή η ερμηνεία είναι μάλλον σε συμφωνία με τα αποτελέσματα έρευνας των Johnson and Inan (1999) και των Haldoupis et al. (2006), η οποία κατέδειξε ότι τα συμβάντα early συνοδεύονται συχνά από bursts of sferics.

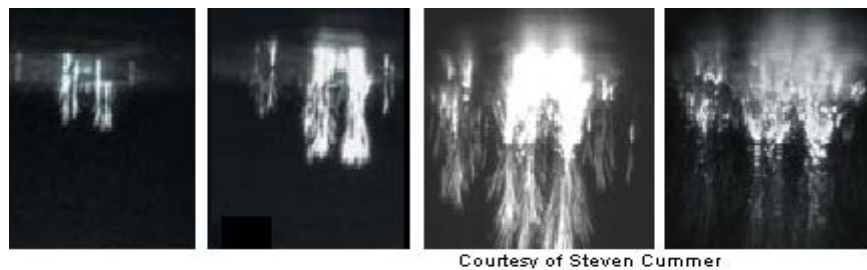
Τελικά, η παρούσα μελέτη για τις 4 καταιγίδες έδειξε ότι δύο δίνουν 100% και δύο 0% συσχέτιση μεταξύ της εμφάνισης των sprites και των διαταραχών τύπου early. Για τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω όμως, θα μπορούσε κάποιος να αποκλείσει τις δύο καταιγίδες που αφορούν την «προβληματική» περίπτωση της ζεύξης NAU και έχουν 0% συσχέτιση. Αυτό θα οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι οι απομένουσες 2 καταιγίδες, η θέση των οποίων είναι ευνοϊκή για ανίχνευση συμβάντων early μέσω των ζεύξεων ισχυρών πομπών στα VLF με συγκρίσιμες συχνότητες περί να 20 kHz, έχουν συσχέτιση ένα προς ένα (one-to-one) μεταξύ sprites και συμβάντων early. Αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα της Mika

(2007), όπου εξετάσθηκαν 5 καταγίδες (από τις καμπάνιες του 2003 και 2005) των οποίων η θέση ήταν όμοια με τις «θετικές» περιπτώσεις της παρούσας μελέτης. Αυτό οδηγεί στην ενίσχυση του σημαντικού συμπεράσματος σχετικά με την φύση των συμβάντων early η οποία έχει την αιτία δημιουργίας τους στον ίδιο μηχανισμό που παράγει και τα φαινόμενα των sprites.

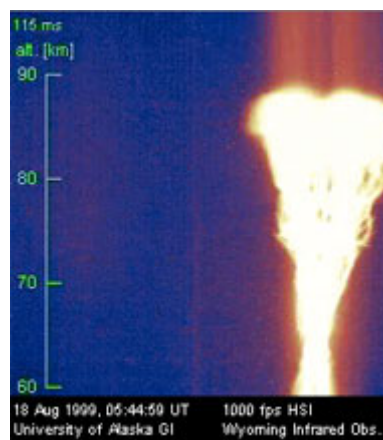
# Παράρτημα Α: Εικόνες των TLEs



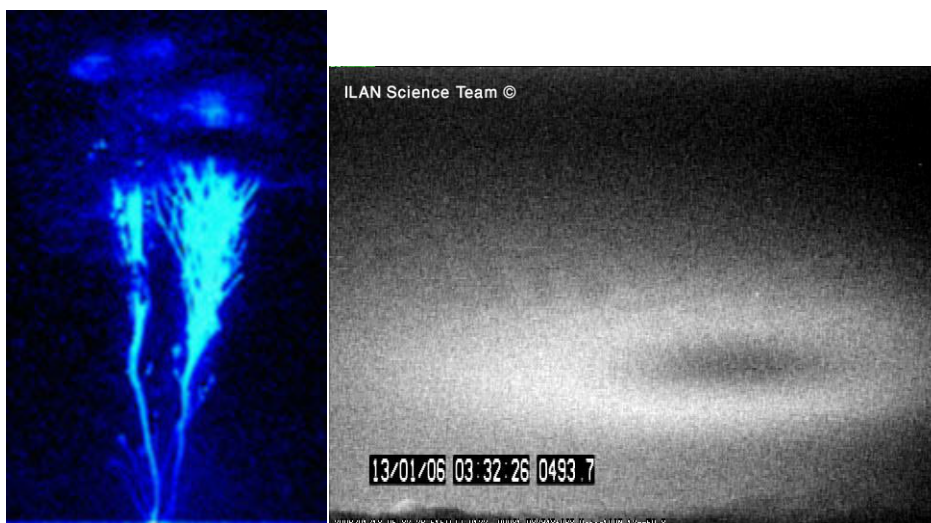
Εικόνα Α.1: Πρώτη έγχρωμη εικόνα ενός sprite (πηγή: <http://www.albany.edu/faculty/rgk/atm101/sprite.jpg>)



Εικόνα Α.2 : Εξέλιξη ενός sprite μορφής “jellyfish” . Η διάρκεια ολόκληρης της σειράς είναι μικρότερη των 3ms. (πηγή: <http://pubs.acs.org/cen/img> )



Εικόνα Α.3 : carrot – sprite (πηγή: <http://pubs.acs.org/cen/img> )



**Εικόνα A.4:** blue jet (δεξιά) (πηγή: <http://images.usatoday.com>), elve (αριστερά) (πηγή: <http://www.tau.ac.il/~royyaniv>)

Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να επισκεφτεί την ιστοσελίδα <http://pubs.acs.org> για περισσότερες εικόνες.

## **Παράρτημα Β: Υπολογισμός της γεωγραφικής θέσης των σημείων των ζεύξεων GCPs**

Η συντομότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων πάνω σε μια σφαίρα ονομάζεται Great Circle Path. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (στην περίπτωση μας η ακτινοβολία VLF) που καταγράφει ο δέκτης, ανεξαρτήτως αν αυτή φτάνει από τον πομπό απ' ευθείας ή μέσω πολλαπλών ανακλάσεων, ακολουθεί την συντομότερη αυτή διαδρομή. Η αναπαράσταση του GCP μεταξύ δύο σημείων πάνω σε έναν επίπεδο χάρτη δεν είναι μια ευθεία, (όπως θα ήταν αν η Γη ήταν επίπεδη), αλλά είναι μια καμπύλη της οποίας η καμπυλότητα εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των δύο σημείων πάνω στη σφαίρα. Αν

αναπαραστήσουμε μια ευθεία γραμμή που ενώνει δύο σημεία ενός επίπεδου χάρτη πάνω σε σφαίρα, παίρνουμε το λεγόμενο Rhumb line. Στο Σχήμα Β.1 α,β φαίνονται οι δύο παραπάνω διαδρομές σε σφαιρικό και επίπεδο χάρτη.

Ο υπολογισμός και η αναπαράσταση των GCPs πάνω σε ένα χάρτη γίνεται με ένα εσωτερικό πρόγραμμα της MATLAB 7.1, που παρουσιάζεται παρακάτω:

1. Ορισμός εύρους του χάρτη:

```
axesm ('mercator', 'MapLatLimit',[a, b], 'MapLonLimit',[c, d])
```

όπου [a, b] το εύρος του γεωγραφικού πλάτους, και [c, d] το εύρος του γεωγραφικού μήκους.

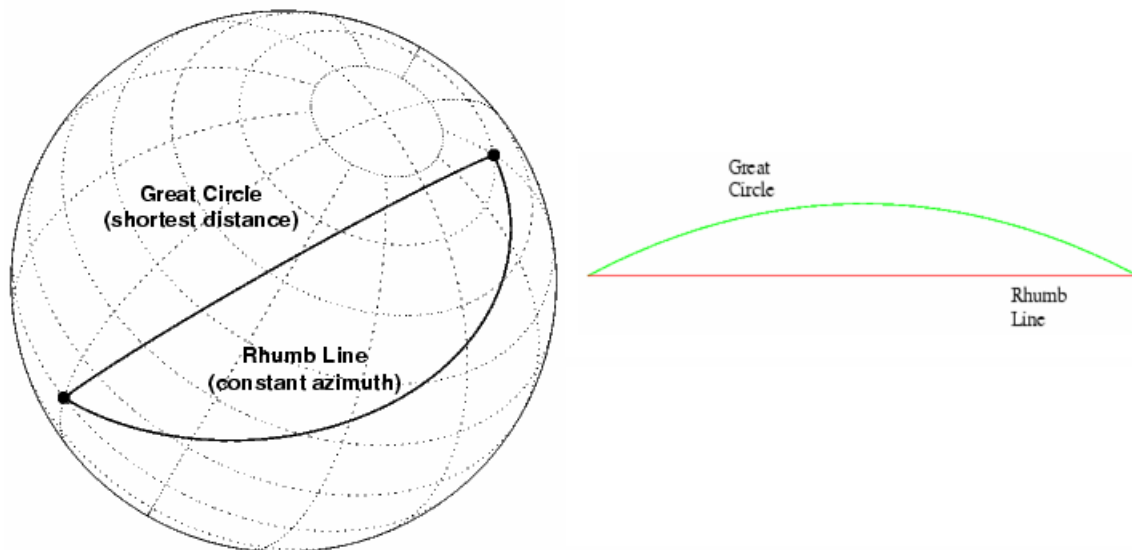
2. Ορισμός των δύο σημείων που θα ενώνονται με GCP:

```
[latrkgc,lontrkgc]=track2 ('gc', e, f, g, h)
```

Όπου e, f το γεωγραφικό πλάτος και μήκος του ενός σημείου, και g, h το γεωγραφικό πλάτος και μήκος του δεύτερου σημείου.

3. Γραφική παράσταση του παραπάνω GCP:

```
plotm( latrkgc, lontrkgc)
```



Σχήμα Β.1: αναπαράσταση των Great Circle και Rhumb Line σε σφαίρα και επίπεδο.

## Βιβλιογραφία

Amvrosiady, N., Ch. Haldoupis, A. Mika: More observations for testing the relationship between Sprites and Subionospheric Early VLF signal perturbations

Blanc, E., T.Farges, R.Roche, D.Brebion, T.Hua : Lightning and sprites observations on board of the International Space Station

Bjarno, J.B.: Transient Luminous Event & Radio Emission Correlation

Chui, Ch.K.: An introduction to WAVELETS, Wavelet Analysis and it's Applications,1992

Cummer, S.A., M. Stanley: Submillisecond resolution lightning currents and sprite development: Observations and implications, Geophysical Research Letters, Vol. 26, 3205 – 3208, 1999/10/15

Cummer, S.A., U.S.Inan : Measurement of charge transfer in sprite- producing lightning using ELF radio atmospherics, Geophysical Research Letters, 24, 1731-1734, July 15, 1997

Cummer, S.A, W.A. Lyons: Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation, Journal of Geophysical Research, Vol. 110, A04304, doi: 10.1029/2004JA010812,2005

Dowden, R.L., J. Brundell, C. Rodger, O. Mochanov, W. Lyons : Are VLF rapid onset , rapid decay perturbations produced by scattering of sprite plasma?, Journal of Geophysical Research, 101, 19175 – 19183, 1996

Farges,T., E. Blanc, A. Le Pichon, T. Neubert, T.H. Allin: Identification of infrasound produced by sprites during the Sprite2003 campaign, Geophysical Research Letters, Vol.32, L01813, doi: 10.1029/2004GL021212, 2005

Griffiths, D.J.: Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης

Haldoupis, C. ,T. Neubert, U.S Inan, A. Mika, T.H. Allin, R.A Marshall: Subionospheric early VLF signal perturbations observed in one – to – one association with sprites, Journal of Geophysical Research, Vol. 109, A10303, doi: 10.1029/2004JA010651, 2004

Haldoupis, C. ,R.J. Steiner, A. Mika, S. Shalimov, R.A. Marshall, U.S. Inan, t. Boesinger, T. Neubert: “Early/ slow” events: A new category of VLF perturbations observed in relation with sprites, Journal of Geophysical Research, Vol.111, A11321, doi: 10.1029/2006JA011960, 2006

Haldoupis, C.: Εισαγωγικά Στοιχεία Ατμοσφαιρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2000



Hu, W., S.T. Cummer, W.A. Lyons, T.E. Nelson: Lightning charge moment changes for the initiation of sprites, *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 8, 10.1029/2001GL014593, 2002

Johnson, M.P., U.S. Inan, D.S. Lauben: Subionospheric VLF Signatures of Oblique (Nonducted) Whistler – Induced Perturbation, *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, No. 23, 3569 – 3572, 1999/12/01

Kwang-Hua Chu, A.: Possible formation of sprites in the free electromagnetic field, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68 (2006)

Idone, V.P., A.B. Henderson, R.W. Moore, R.B. Pyle: A reexamination of peak current calibration of the National Lightning Detection Network, *Journal of Geophysical Research*, 98, 18323 – 18332, 1993

Lyons, W.A., M.D. Schmidt: The discovery of red sprites as an opportunity for informal science education, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68 (1998)

Lyons, W.A., T.E. Nelson, E.R. Williams, S.A. Cummer, M.A. Stanley: Characteristics of Sprite-Producing Positive Cloud-to-Ground lightning during the 19 July 2000 STEPS Mesoscale Convective Systems: *Monthly Weather Review*, Vol. 131, 2417 – 2426, 2003/10

Marshall, R.A., U.S. Inan, T.W. Chevalier: Early VLF Perturbations Caused by Lightning EMP – Driven Dissociative Attachment, *Geophysical Research Letters*, 2008/02/19

Matsudo, Y., Tomoyuki Suzuki, Masashi Hayakawa, Kozo Yamashita, Yoshiaki Ando, Koichiro Michimoto, V. Korepanov: Characteristics of Japanese winter sprites and their parent lightning as estimated by VLF lightning and ELF transients, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 69 (2007) 1431- 1446

Milikh, G., J.A. Vladiva, K. Papadopoulos: Spectrum of red sprites, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 60 (1998) 907 – 915

Mika, A.: Very low frequency EM wave studies of transient luminous events in the lower ionosphere, PhD Thesis, University of Crete, April 2007

Mika, A., C. Haldoupis, T. Neubert, H.T. Su, R.R. Hsu, R.J. Steiner, R.A. Marshall: Early VLF perturbations observed in association with elves, *Annales Geophysicae*, 24, 2179 – 2189, 2006

Neubert, T., M. Rycroft, T. Farges, E. Blanc, O. Chanrion, E. Arnone, A. Odzimek, N. Arnold, C.-F. Turunen, T. Boesinger, A. Mika, C. Haldoupis, R.J. Steiner, O. van der Velde, S. Soula, P. Berg, F. Boberg, P. Thejll, B. Christiansen, M. Ignaccolo, M. Fuellekrug, P.T. Verronen, J. Montanya, N. Crosby: Recent Results from Studies of Electric Discharges in the Mesosphere

Pasko, V.P., U.S. Inan, T.F. Bell: Mesosphere – troposphere coupling due to sprites, *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 19, 3821-3824, 2001/10/01

Price, C. : Global Thunderstorm Activity, Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges, 85 – 99, 2006

Rodger, C.J.: Subionospheric VLF perturbations associated with lightning discharges, Journal of Atmospheric and Solar- Terrestrial Physics 65 (2003) 591 – 606

Rodger ,C.J.: Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations, Reviews of Geophysics, 37, 317 – 336, 1999//08/03

Stanley,M., M. Brook, P. Krehbiel, S. A. Cummer: Detection of daytime sprites via a unique sprite ELF signature, Geophysical Research Letters, Vol. 27, No. 6, 871-874, 2000/03/15

Williams, E.R.: Sprites, Elves, and glow discharge tubes, Physics Today, 2001/11

Yair,Y., Peter Israelevich, Adam D. Devir, Meir Moalem, Colin Price, Joachim H. Joseph, Zev Levin, Baruch Ziv, Abraham Sternlieb, Amit Teller: new observations of sprites from the space shuttle, Journal of Geophysical Research, Vol. 109, D15201, doi:10.1029/2003JD004497,2004