

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

Τα ηλεκτρικά φαινόμενα που λαβαίνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και οι ηλεκτρικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας παίζουν σημαντικό ρόλο σε μετεωρολογικές και άλλες ατμοσφαιρικές διεργασίες. Ένα παράδειγμα που υποπίπτει άμεσα στην αντίληψή μας είναι οι κεραυνοί. Με τα ατμοσφαιρικά ηλεκτρικά φαινόμενα ασχολείται ένας ξεχωριστός κλάδος της ατμοσφαιρικής φυσικής, που ονομάζεται ατμοσφαιρικός ηλεκτρισμός. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφέρουμε σύντομα μόνο ορισμένες βασικές έννοιες και μηχανισμούς ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού.



5.1 Γενικές αρχές. Ατμοσφαιρικά ιόντα. Αγωγιμότητα.

Είναι γνωστό ότι ένας φορτισμένος αγωγός στην ατμόσφαιρα, ηλεκτρικά μονωμένος από το έδαφος, χάνει σταδιακά το φορτίο του. Προκύπτει ότι ο ρυθμός απώλειας είναι ανάλογος του ολικού φορτίου στον αγωγό. Δηλαδή

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ. \quad (5.1)$$

Ολοκληρώνοντας αυτή τη σχέση παίρνουμε

$$Q(t) = Q_0 e^{-at}, \quad (5.2)$$

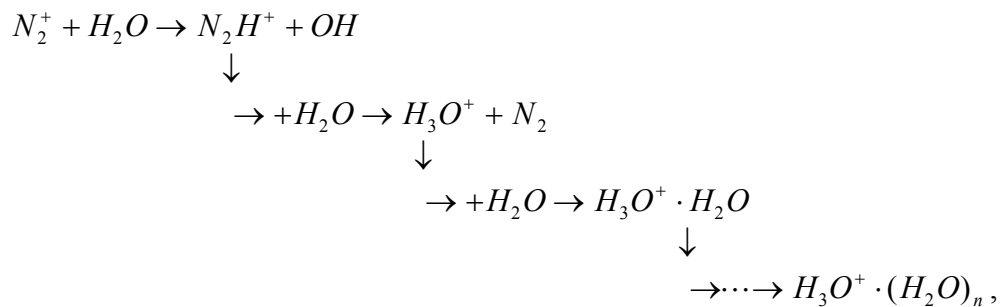
όπου a είναι ο συντελεστής εκφόρτισης. Η εκφόρτιση οφείλεται στο γεγονός ότι η ατμόσφαιρα δεν είναι τέλειος μονωτής αλλά περιέχει ελεύθερα θετικά και αρνητικά ιόντα. Η αριθμητική πυκνότητα (συγκέντρωση) των ιόντων στην ατμόσφαιρα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά.

Ξέρουμε ότι στην ανώτερη ατμόσφαιρα η ηλιακή υπεριώδης ακτινοβολία μήκους κύματος, $\lambda < 2000 \text{ \AA}$ είναι υπεύθυνη για τον ιονισμό των μορίων και των ατόμων και τη δημιουργία της Ιονόσφαιρας. Όμως η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία δεν φτάνει στην τροπόσφαιρα, γιατί απορροφάται στα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Κύριες πηγές παραγωγής ιόντων στην τροπόσφαιρα είναι οι ραδιενεργές ουσίες που αποσυντίθενται στο φλοιό της γης και την ατμόσφαιρα και οι κοσμικές ακτίνες. Ο πυρήνας των ραδιενεργών στοιχείων είναι ασταθής και τείνει διασπώμενος προς μια ευσταθή κατάσταση. Κατά τη διάσπαση απελευθερώνονται ορισμένα σωματίδια, όπως πυρήνες He^{++} (ακτίνες α) ή ηλεκτρόνια (ακτίνες β) και ακτίνες γ , οι οποίες μπορεί να είναι αρκετά ενεργητικές ώστε να προκαλέσουν δευτερογενή

ιονισμό. Π.χ., το ουράνιο διασπάται σύμφωνα με την αντίδραση: ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$, η οποία ακολουθείται από την αντίδραση: ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + e^-$.

Τα τελευταία χρόνια, εκτός από τις φυσικές ραδιενεργές ουσίες, έχουν προστεθεί στην ατμόσφαιρα και ραδιενεργά κατάλοιπα από τις δοκιμές πυρηνικών όπλων. Πολλά από αυτά παραμένουν για πολύ χρόνο στην ατμόσφαιρα, πριν επιστρέψουν στη επιφάνεια της γης, με αποτέλεσμα την αύξηση των ατμοσφαιρικών ιόντων. Ο ιονισμός από τις ραδιενεργές ουσίες οφείλεται κυρίως στις ακτίνες β και γ.

Μια εξίσου σπουδαία πηγή ατμοσφαιρικού ιονισμού είναι οι κοσμικές ακτίνες υψηλής ενέργειας (κυρίως πρωτόνια) που φθάνουν στο περιβάλλον της γης από το σύμπαν και μέσω κρούσεων με τα συστατικά ατμοσφαιρικά αέρια δημιουργούν ιόντα. Οι κοσμικές ακτίνες χαμηλότερης ενέργειας απορροφούνται στην ανώτερη ατμόσφαιρα, ενώ οι πιο ενεργητικές φθάνουν μέχρι το έδαφος. Ο μέσος αριθμός ζευγών ιόντων που παράγονται στο επίπεδο της θάλασσας από τις κοσμικές ακτίνες, είναι περίπου $1.5/\text{cm}^2\text{s}$. Η παραγωγή ιόντων αυξάνει με το γεωμαγνητικό πλάτος, επειδή το μαγνητικού πεδίο της γης κατευθύνει τις κοσμικές ακτίνες προς τους γεωμαγνητικούς πόλους. Τα πρωτογενή ιόντα που παράγονται από την ακτινοβολία είναι ιονισμένα μόρια αέρα και ηλεκτρόνια. Τα πρωτογενή ιόντα και τα ηλεκτρόνια ακολουθούν κατόπιν διάφορα στάδια, κατά τα οποία αντιδρούν ή προσκολλώνται σε άλλα μόρια και δημιουργούν φορτισμένα συγκροτήματα από 15-20 μόρια. Ένα παράδειγμα είναι η περίπτωση του πρωτογενούς N_2^+ το οποίο ακολουθεί την ακόλουθη πορεία:



με τελικό αποτέλεσμα: $N_2^+ + (n+2)H_2O \rightarrow H_3O^+ (H_2O)_n + OH + N_2$. Οι παραπάνω αντιδράσεις λαβαίνουν χώρα σε χρόνους της τάξης μερικών μs. Αυτά τα συγκροτήματα μορίων (πχ, το $H_3O^+ (H_2O)_n$) είναι αρκετά σταθερά και αντιπροσωπεύουν κατηγορία των *μικρών ιόντων* στην ατμόσφαιρα. Τα μικρά ιόντα μπορούν να προσαρτηθούν σε αιωρήματα (aerosols) οπότε μιλάμε για *μεγάλα ιόντα*.

Τα μικρά ιόντα μπορούν να επανασυνδεθούν θετικά και αρνητικά και να χάσουν τα φορτία τους. Στην πράξη επικρατεί μια κατάσταση ισορροπίας, κατά την οποία ο αριθμός των ιόντων που δημιουργούνται, μέσω ραδιενεργών διασπάσεων και κοσμικής ακτινοβολίας, ισούται με τον αριθμό των ιόντων που εξαφανίζονται, μέσω επανασύνδεσης ή προσκόλλησης σε αιωρήματα. Η ισορροπία παραγωγής και απωλειών εκφράζεται από τη σχέση

$$q = \alpha n^2 + \beta nN. \quad (5.3)$$

όπου q είναι ο ολικός ρυθμός παραγωγής ανά μονάδα όγκου και μονάδα χρόνου, n είναι η συγκέντρωση μικρών ιόντων, N η συγκέντρωση αιωρημάτων, α ο

συντελεστής ανασύνδεσης (υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, STP, $\alpha = 1.6 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{s}$) και β ο συντελεστής προσκόλλησης, ($\beta = 3 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{s}$, STP). Εάν τα α , β , N και q είναι γνωστά από μετρήσεις, τότε η συγκέντρωση των μικρών ιόντων μπορεί να βρεθεί (5.3). Κοντά σε πόλεις όπου το N φτάνει $\sim 10^5 \text{cm}^{-3}$, οι απώλειες των μικρών ιόντων οφείλονται κυρίως στον όρο $\beta n N$, ενώ ο όρος ανασύνδεσης αn^2 είναι πιο σημαντικός σε υπαίθριες περιοχές και πάνω από θάλασσες. Η συγκέντρωση των μικρών ιόντων αυξάνει με το ύψος από $\sim 6 \times 10^2 \text{cm}^{-3}$ στο επίπεδο της θάλασσας, έως $5 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$ σε ύψος $\sim 15 \text{km}$. Αυτό οφείλεται στην δραστική μείωση της συγκέντρωσης των αιωρημάτων με το ύψος και στην αύξηση της παραγωγής λόγω ενίσχυσης του αποτελέσματος των κοσμικών ακτίνων. Ο αριθμός των θετικών ιόντων είναι κατά ένα ποσοστό ($\sim 10 - 15\%$) μεγαλύτερος από τον αριθμό των αρνητικών ιόντων, έτσι ώστε στην κατώτερη ατμόσφαιρα, υπάρχει ένα καθαρό θετικό φορτίο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια προσφύονται ευκολότερα σε μεγάλα σωμάτια αιωρημάτων τα οποία αποσύρονται από την ατμόσφαιρα ευκολότερα καταλήγοντας στη Γη, η οποία και φορτίζεται θετικά ως προς την ατμόσφαιρα.

Τα ιόντα υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, μπαίνουν σε κίνηση. Η ιοντική κινητικότητα ορίζεται σαν η μέση ταχύτητα ολίσθησης u_i υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου ίσου με μονάδα, δηλαδή, $\kappa_i = u_i / E$. Η κινητικότητα κ_i εξαρτάται από τη φύση του ιονισμένου μέσου, τις διαστάσεις των ιόντων, την μέση ελεύθερη διαδρομή και τη θερμοκρασία. Από την κινητική θεωρία των αερίων προκύπτει ότι η ιοντική κινητικότητα δίνεται κατά προσέγγιση από τη σχέση

$$\kappa_i = (q_i / 2m_i)(l/\bar{v}) \quad \text{με} \quad \bar{v} = (3KT/2m_i)^{1/2}, \quad (5.4)$$

όπου (q_i/m_i) είναι ο λόγος φορτίου/μάζας του ιόντος, l η μέση ελεύθερη διαδρομή και \bar{v} η μέση ταχύτητα της θερμικής κίνησής του, K η σταθερά Boltzmann, και T η θερμοκρασία του ιοντικού αερίου. Η κινητικότητα των μικρών ιόντων στον αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας είναι $1-2 \times 10^{-4} (\text{m}^2/\text{Vs})$, ενώ των μεγάλων είναι $10^{-8}-10^{-6} (\text{m}^2/\text{Vs})$. Δηλαδή η κινητικότητα των μικρών ιόντων είναι από εκατό φορές έως δέκα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή των μεγάλων ιόντων.

Η παρουσία των ιόντων στην ατμόσφαιρα καθορίζει την αγωγιμότητά της. Τα ιόντα, ανάλογα με το φορτίο τους, κινούνται είτε παράλληλα είτε αντιπαράλληλα ενός ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} , με ταχύτητα ολίσθησης $\mathbf{u}_i^\pm = \kappa_i^\pm \mathbf{E}$. Κάθε ιόν i^\pm φέρει ένα φορτίο e και συνεπώς τα ιόντα τύπου i^\pm με συγκέντρωση n_i^\pm , συνεισφέρουν ποσότητα $\mathbf{j}_i^\pm = \kappa_i^\pm n_i^\pm e \mathbf{E}$, στο ρεύμα που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, υπό την επίδραση του πεδίου \mathbf{E} . Έτσι η ολική πυκνότητα ρεύματος είναι

$$\mathbf{J} = \sum_i (\mathbf{j}_i^+ + \mathbf{j}_i^-) = \sum_i (\kappa_i^+ n_i^+ e_i^+ + \kappa_i^- n_i^- e_i^-) \mathbf{E} = \lambda \mathbf{E}. \quad (5.5)$$

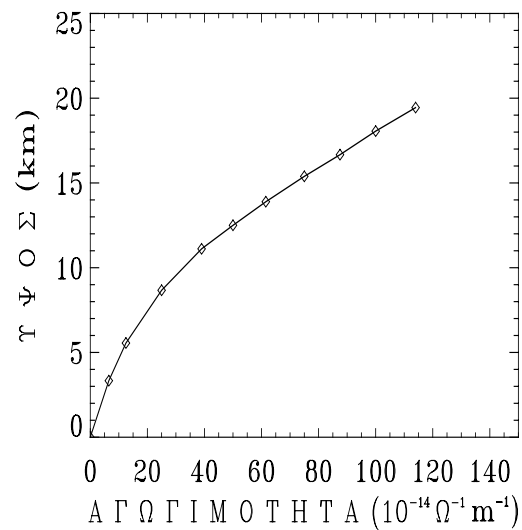
η ποσότητα

$$\lambda = \sum_i (\kappa_i^+ n_i^+ e_i^+ + \kappa_i^- n_i^- e_i^-) = 1/r \quad (5.6)$$

είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το $r = 1/\lambda$ η αντιστασιμότητα (ειδική αντίσταση) του ατμοσφαιρικού αέρα. Σημειώστε ότι το φορτίο e^- ή e^+ στην (5.6) αντιπροσωπεύει

την απόλυτη τιμή του ηλεκτρικού φορτίου και είναι συνήθως ίσο με το στοιχειώδες φορτίο $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Το παραπάνω άθροισμα περιλαμβάνει όλων των τύπων τα ιόντα, επειδή όμως η κινητικότητα των μικρών ιόντων είναι κατά πολύ μεγαλύτερη αυτής των μεγάλων, η αγωγιμότητα του αέρα εξαρτάται (κατά ~95%) από τη συγκέντρωση και την κινητικότητα των μικρών ιόντων.

Η αγωγιμότητα λ αυξάνει με το ύψος λόγω της αύξησης της κινητικότητας κ με το ύψος, που οφείλεται στη αύξηση της μέσης ελευθερης διαδρομής αλλά και στην μείωση της θερμοκρασίας, ενώ με το ύψος αυξάνει και η συγκέντρωση των μικρών ιόντων λόγω κυρίως της μείωσης της συγκέντρωσης N των μεγάλων αιωρημάτων. Κοντά στο έδαφος η αγωγιμότητα είναι $\lambda = 2.25 \times 10^{-14} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$, η οποία και είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την αγωγιμότητα του χαλκού (καλού αγωγού), του γερμανίου (ημιαγωγού), και του γυαλιού (μονωτή), που είναι $10^8 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$, $10^{-1} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ και $10^{-11} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$, αντίστοιχα. Το Σχήμα 5.1 δίνει μια εικόνα της μεταβολής της αγωγιμότητας λ με το ύψος, όπου οι τιμές εκεί είναι απλώς αντιπροσωπευτικές.



Σχήμα 5.1 Τυπική καμπύλη μεταβολής της ατμοσφαιρικής αγωγιμότητας της με το ύψος.

Η αγωγιμότητα και το ηλεκτρικό πεδίο στην ατμόσφαιρα, παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή φορτίων στα νέφη, που οδηγούν στους κεραυνούς. Η εκφόρτιση του αγωγού, που αναφέραμε στην αρχή, εξηγείται ως εξής. Το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού είναι $E = \sigma/\epsilon_0$, όπου ϵ_0 είναι η ηλεκτρική επιδεκτικότητα, ή διηλεκτρική σταθερά του κενού, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ (farad / m)}$ και σ η πυκνότητα φορτίου στην επιφάνεια του αγωγού. Συνεπώς το ολικό φορτίο στον αγωγό είναι $Q = \int_S \sigma ds$.

Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στο περιβάλλον του αγωγού ιόντα κινούνται προς και από τον αγωγό παράγοντας ρεύμα ίσο με

$$I = -\frac{dQ}{dt} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = \int_S \lambda \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = (\lambda/\epsilon_0) \int_S \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{\lambda Q}{\epsilon_0}, \quad (5.7)$$

Όπου το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση του φορτίου με το χρόνο. Ολοκληρώνοντας την (5.7) παίρνουμε το φορτίο στον αγωγό συναρτήσει του χρόνου

$$Q(t) = Q_0 \exp(-\lambda t/\epsilon_0). \quad (5.8)$$

Από την (5.8) βλέπουμε ότι η εκφόρτιση του αγωγού οφείλεται στην αγωγιμότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ ο χαρακτηριστικός χρόνος εκφόρτισης είναι $\tau = \epsilon_0/\lambda$.

5.2 Το ηλεκτρικό πεδίο στην Ατμόσφαιρα

Στην ατμόσφαιρα υπάρχει πάντα ένα ηλεκτρικό πεδίο σαν αποτέλεσμα του καθαρού ελεύθερου φορτίου στην επιφάνεια της γης και στην ατμόσφαιρα. Το ηλεκτρικό πεδίο στην ατμόσφαιρα είναι ηλεκτροστατικής φύσης και μεταβάλλεται ευρύτατα, χωρικά και χρονικά. Η μέση τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στην ατμόσφαιρα πλησίον της επιφάνειας της γης είναι $\sim 120 \text{ V/m}$ και κατευθύνεται προς τη γη. Τοπικά και χρονικά όμως η διεύθυνση και το μέγεθος του πεδίου εξαρτάται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή (νεφοκάλυψη, τύπο νεφών, ανέμους, βροχοπτώσεις, ηλεκτρικές καταιγίδες, αιωρήματα, κλπ). Γι' αυτό όταν αναφερόμαστε στο ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να διευκρινίζουμε τι είδους ατμοσφαιρικές συνθήκες επικρατούν. Έτσι έχουμε: 1) πεδίο καλού καιρού (fair weather field) όταν δεν υπάρχουν υδροαπόβλητα, λιγότερο από 4/10 του ουρανού είναι νεφοσκεπές και οι άνεμοι δεν είναι ισχυροί και 2) πεδίο διαταραγμένου καιρού (disturbed weather field) στις άλλες περιπτώσεις. Τυπικό παράδειγμα διαταραγμένου καιρού είναι, όταν επικρατούν καταιγίδες.

Όπως προαναφέραμε, μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους δείχνουν ότι το πεδίο μεταβάλλεται τοπικά και χρονικά αλλά κατά μέσο όρο έχει μέτρο 120 V/m και κατευθύνεται προς τη γη. Δηλαδή,

$$\mathbf{E}_0 = -120\hat{z} \text{ (V / m)} \quad (5.9)$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το πεδίο κατευθύνεται προς τη γη, από όπου και συμπεραίνεται ότι η γη είναι αρνητικά φορτισμένη. Εφαρμόζοντας το νόμο του Gauss και, λαμβάνοντας υπόψη ότι η γη είναι ένας καλός αγωγός, βρίσκουμε την πυκνότητα του καθαρού φορτίου, σ , στην επιφάνεια της γης,

$$\sigma = -\epsilon_0 E_0 = \frac{Q}{4\pi R_e^2}, \quad (5.10)$$

όπου, Q είναι το ολικό φορτίο και $R_e = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$ η μέση ακτίνα της γης. Αντικαθιστώντας την παραπάνω τιμή του E_0 βρίσκουμε ότι η μέση τιμή της πυκνότητας καθαρού ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια της γης είναι $\sigma = -1.06 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2$. (Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε 660000 ηλεκτρόνια ανά τετραγωνικό εκατοστό γήινης επιφάνειας.) Πολλαπλασιάζοντας με την επιφάνεια της γης, $4\pi R_e^2 = 5.09 \times 10^{14} \text{ m}^2$, βρίσκουμε ότι το συνολικό καθαρό φορτίο στη γη είναι

$$Q = -4\pi R_e^2 \sigma = -5.09 \times 10^{14} \text{ m}^2 \times 1.06 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2 = -5.4 \times 10^5 \text{ C}.$$

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι καθαρά ηλεκτροστατικό και συνεπώς μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει ενός δυναμικού V ($\mathbf{E} = -\text{grad}V$). Αγνοώντας τη χρονική μεταβολή, αν $V(x,y,z)$ είναι η τιμή του δυναμικού στο σημείο (x,y,z) τότε ισχύει

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}. \quad (5.11)$$

Στην περίπτωση του καλού καιρού, η κατακόρυφη συνιστώσα E_z είναι πολύ μεγαλύτερη από τις οριζόντιες, οι οποίες για πρακτικούς λόγους αγνοούνται, έτσι ώστε να έχουμε

$$E = E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (5.12)$$

δηλαδή το ηλεκτρικό πεδίο είναι συνάρτηση μόνο της κατακόρυφου συνιστώσας z .

Από μετρήσεις σε μεγαλύτερα ύψη έχει βρεθεί ότι το E μειώνεται γρήγορα με το ύψος, έτσι ώστε, πχ, στα 10 km είναι το $\sim 3\%$ αυτού στην επιφάνεια της γης. Έχει επίσης βρεθεί ότι το $(dE/dz) \neq 0$ και μειώνεται με το ύψος. Τούτο βεβαίως σημαίνει ότι στην ατμόσφαιρα υπάρχει καθαρό θετικό φορτίο χώρου, του οποίου η πυκνότητα ελαττώνεται με το ύψος, όπως διευκρινίζεται γραφικά στο Σχήμα 5.2.

Όπως γνωρίζουμε, η σχέση μεταξύ του (dE/dz) και της πυκνότητας του καθαρού φορτίου ρ δίνεται από την Εξίσωση του Poisson

$$-\frac{d^2V}{dz^2} = \frac{dE}{dz} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (5.13)$$

Σύμφωνα με αυτήν, η πυκνότητα του καθαρού φορτίου χώρου, ρ , είναι ανάλογη της μεταβολής του πεδίου, (dE/dz) , και, συνεπώς, όταν η μία ποσότητα μειώνεται, μειώνεται και η άλλη. Αν τώρα συμβεί σε κάποιο ύψος, $z = z_1$, να μηδενίζεται το πεδίο, $E(z_1) = 0$, τότε, σύμφωνα με το νόμο του Gauss, το συνολικό θετικό φορτίο που περιέχεται στο στρώμα μεταξύ της επιφάνειας και του ύψους z_1 , έχει εξισωθεί με το αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια της γης. Με βάση την (5.13) σε μαθηματική γλώσσα αυτά εκφράζονται ως εξής:

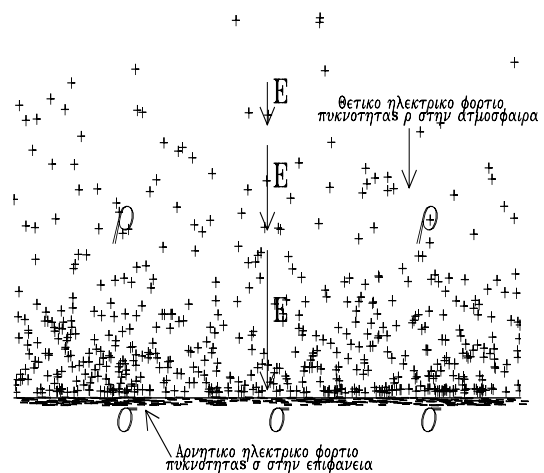
$$E(z) = E_0 + \frac{1}{\epsilon_0} \int_0^z \rho dz, \quad (5.14)$$

και στο ύψος z_1 ,

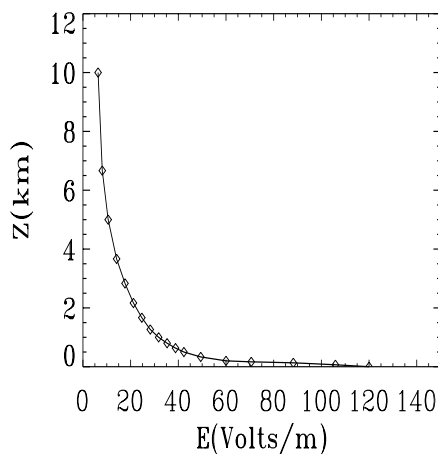
$$E(z_1) = 0 = E_0 + \frac{1}{\epsilon_0} \int_0^{z_1} \rho dz \Rightarrow \sigma = -\epsilon_0 E_0 = \int_0^{z_1} \rho dz, \quad (5.15)$$

όπου χρησιμοποιήσαμε την (5.10). Τα Σχήματα 5.3 και 5.4 δείχνουν τυπικές καμπύλες μεταβολής του πεδίου E και της πυκνότητας θετικού φορτίου ρ με το ύψος.

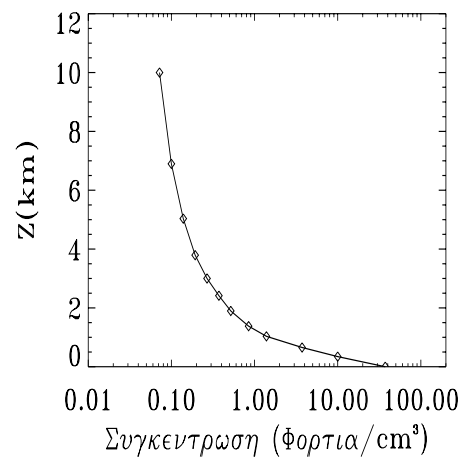
Στην Παράγραφο 5.1 αναφέρθηκε ότι η αριθμητική συγκέντρωση των ιόντων, n_i^\pm , αυξάνει με το ύψος. Αυτό δεν αντιφάσκει με το γεγονός ότι η πυκνότητα καθαρού φορτίου χώρου, ρ , ελαττώνεται με το ύψος. Θα πρέπει να ξεκαθαρισθεί ότι το ηλεκτρικό πεδίο στην ατμόσφαιρα οφείλεται στην παρουσία ελεύθερου φορτίου με καθαρή πυκνότητα (θετικά-αρνητικά ιόντα) ρ , η οποία συμβαίνει να είναι θετική και



Σχήμα 5.2 Πυκνότητα καθαρού ηλεκτρικού φορτίου στην ατμόσφαιρα, ρ , και σ , επιφανειακή πυκνότητα φορτίου στο έδαφος. Η πυκνότητα φορτίου, ρ , και το ηλεκτρικό πεδίο, E , στην ατμόσφαιρα ελαττώνονται με το ύψος. Το ηλεκτρικό πεδίο, E , κατευθύνεται προς τα κάτω και παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή του στην επιφάνεια της γης.



Σχήμα 5.3 Μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου με το ύψος.



Σχήμα 5.4 Μεταβολή της πυκνότητας καθαρού ηλεκτρικού φορτίου με το ύψος.

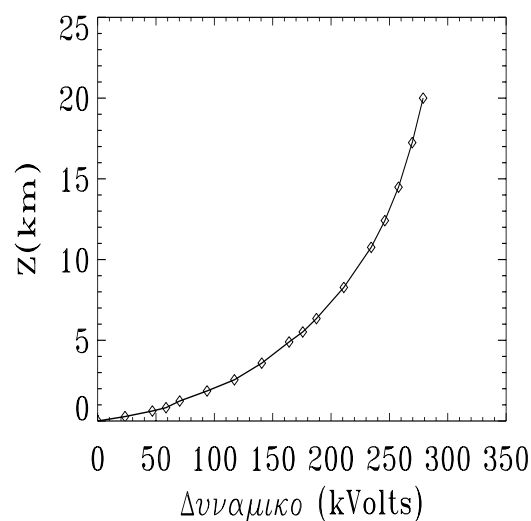
να μειώνεται με το ύψος, ενώ η συγκέντρωση ελεύθερων ιόντων, n_i^\pm , αναφέρεται σε όλα τα φορτία που μπορούν να κινηθούν και συμβάλλουν στην αγωγιμότητα της ατμόσφαιρας, η οποία αυξάνει με το ύψος.

Τελικά παραμένει να θεωρήσουμε τη μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού V στην ατμόσφαιρα. Η γη σαν καλός αγωγός αποτελεί μια ισοδυναμική επιφάνεια την οποία παίρνουμε και σαν επιφάνεια αναφοράς, έτσι ώστε $V(z=0) = V_0 = 0$. Ολοκληρώνοντας την (5.12) παίρνουμε

$$V(z) = -\int_0^z E dz. \quad (5.16)$$

Επειδή E είναι σχετικά μεγάλο κοντά στο έδαφος, αρνητικό και ελαττώνεται γρήγορα με το ύψος τείνοντας στο μηδέν, το δυναμικό, V , πρέπει να αυξάνεται γρήγορα στην αρχή και να τείνει σταδιακά με το ύψος προς μία σταθερή τιμή. Η τελική αυτή τιμή είναι 3×10^5 Volts και, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5.5, συναντάται περί τα 20km. Ο πολύ μικρός ρυθμός μεταβολής του δυναμικού που μετριέται σε ύψη μεγαλύτερα των 20km, δείχνουν ότι πάνω από τα ύψη αυτά η ατμόσφαιρα θεωρείται καλός αγωγός (καθόσον σε ένα αγωγό δεν έχουμε μεταβολή δυναμικού).

Από την ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου σε μία αγωγίμη ατμόσφαιρα, συμπεραίνουμε ότι πρέπει να υπάρχει ένα ρεύμα πυκνότητας $\mathbf{j} = \lambda \mathbf{E}$ που κατευθύνεται προς τη γη. Το ρεύμα αυτό αγωγιμότητας, που σε συνθήκες καλού καιρού κατευθύνεται προς τη γη, ελαττώνει (ουδετεροποιεί) το επιφανειακό φορτίο της γης και κατά συνέπεια και το ηλεκτρικό πεδίο στην



Σχήμα 5.5 Μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού στην ατμόσφαιρα με το ύψος.

επιφάνειά της, που σε μια χρονική στιγμή δίνεται σύμφωνα με την εξίσωση Gauss

$$E(t) = (\sigma(t)/\epsilon_0). \quad (5.17)$$

Η μεταβολή του πεδίου E με το χρόνο είναι

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{Q}{\Delta S} \right) = -\frac{1}{\epsilon_0} j = -\frac{1}{\epsilon_0} \lambda E, \quad (5.18)$$

όπου το αρνητικό σημείο υπεισέρχεται γιατί το φορτίο μειώνεται με το χρόνο. Από την (5.18) προκύπτει

$$\mathbf{E}(t) = -\hat{z}E_0 \exp\left(-\frac{\lambda}{\epsilon_0}t\right) = -\hat{z}E_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (5.19)$$

όπου $E_0 = 120(V/m)$ και $\tau = (\epsilon_0 / \lambda)$. Αν αντικαταστήσουμε $\lambda = 2.25 \times 10^{-14} \text{ mho/m}$ και $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, βρίσκουμε $\tau = (\epsilon_0 / \lambda) = 393 \text{ sec} = 6.5 \text{ min}$. Από την (5.19) βρίσκουμε ότι μετά από περίπου 30min το πεδίο στην επιφάνεια της γης θα έχει ελαττωθεί στο ένα εκατοστό του E_0 . Κατά μέσο όρο όμως το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια της γης παραμένει σταθερό και συνεπώς πρέπει να εξηγήσουμε το μηχανισμό που το διατηρεί

Εναλλακτικά, για συνθήκες καλού καιρού, η ηλεκτρική κατάσταση στην ατμόσφαιρα μπορεί να προσομοιωθεί με ένα σφαιρικό πυκνωτή, με εσωτερικό αγωγό τη γη και εξωτερικό την ανώτερη ατμόσφαιρα ή ιονόσφαιρα (Σχήμα 5.6). Η μεταξύ των αγωγών ατμόσφαιρα έχει κάποια μικρή αγωγιμότητα λ . Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο σφαιρικός πυκνωτής είναι φορτισμένος, και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σφαιρικών αγωγών του πυκνωτή είναι $V = 300 \times 10^3 \text{ Volts}$.

Ξέροντας την αγωγιμότητα λ και το πεδίο E , μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα ρεύματος ανά μονάδα επιφανείας, και τη διαρροή μέσω της ατμόσφαιρας,

$$j = \lambda E = 2.25 \times 10^{-14} (\text{Mho} / \text{m}) \times 120(V / \text{m}) = 2.7 \times 10^{-12} \text{ A} / \text{m}^2. \quad (5.20)$$

Αφού η ολική επιφάνεια της γης είναι $S \approx 5 \times 10^{14} \text{ m}^2$, το ολικό ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή είναι

$$I = jS = 2.7 \times 10^{-12} (\text{A} / \text{m}^2) \times 5 \times 10^{14} \text{ m}^2 = 1350 \text{ A}. \quad (5.21)$$

Ενώ το ολικό φορτίο στον πυκνωτή είναι

$$Q = \sigma S = 5 \times 10^4 \times 1.1 \times 10^9 = 5.5 \times 10^5 \text{ C} \quad (5.22)$$

ενώ η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{5.5 \times 10^5 \text{ C}}{3 \times 10^5 \text{ V}} = 1.8 \text{ F}. \quad (5.23)$$

Από το νόμο του Ohm, η ολική αντίσταση της ατμόσφαιρας είναι

$$R = \frac{V}{I} = \frac{3 \times 10^5}{1350} = 222 \text{ Ohm} . \quad (5.24)$$

Λόγω της διαρροής φορτίων, ο πυκνωτής θα εκφορτιστεί σύμφωνα με τη σχέση

$$Q(t) = Q_0 \exp(-t/RC) , \quad (5.25)$$

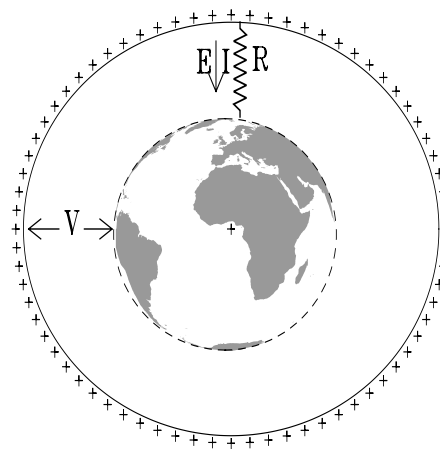
με σταθερά χρόνου

$$\tau = RC = 222 \text{ Ohm} \times 1.8 \text{ Farad} = 400 \text{ sec} \approx 7 \text{ min} . \quad (5.26)$$

Από τα προηγούμενα λοιπόν συμπεραίνουμε, ότι το φορτίο της γης θα πρέπει να ουδετεροποιηθεί πολύ γρήγορα. Τούτο όμως δεν συμβαίνει, δηλαδή το φορτίο της γης παραμένει σχεδόν σταθερό, γεγονός που συνεπάγεται την ύπαρξη κάποιου ισχυρού μηχανισμού ηλεκτρογεννήτριας που συνεχώς φορτίζει την γή, σε σχέση με τη ατμόσφαιρα. Δηλαδή υπάρχει ένας μηχανισμός που μεταφέρει αρνητικά φορτία προς τη Γη, με ρυθμό ίσο με 1350 Cb/s. Αυτός ο μηχανισμός, φόρτισης του *πυκνωτή* ατμόσφαιρα-γη, όπως θα δούμε, σχετίζεται άμεσα με τις κεραυνο-καταιγίδες, που λαβαίνουν χώρα ανά τον κόσμο με ρυθμό μερικών εκατοντάδων ανά πάσα στιγμή.

Η συνεχής φόρτιση του συστήματος ατμόσφαιρα-γη είναι γνωστή ως **βασικό πρόβλημα του**

ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού, το οποίο είχε αρχικά απασχολήσει πολλούς ερευνητές ενώ πολλές θεωρίες είχαν προταθεί για την εξήγησή του, χωρίς όμως μεγάλη επιτυχία. Η κατανόησή ήλθε αρκετά αργότερα όταν άρχισαν να γίνονται ηλεκτρικές μετρήσεις μέσα σε καταιγιδοφόρα νέφη, τα οποία αποδείχτηκε ότι ενεργούν σαν μεγάλες ηλεκροστατικές γεννήτριες.



Σχήμα 5.6 Ηλεκτρικό ανάλογο του συστήματος γη \longleftrightarrow ιονόσφαιρα είναι ο σφαιρικός πυκνωτής, εσωτερικός αγωγός του οποίου είναι η επιφάνεια της γης και εξωτερικός η ιονόσφαιρα. Η κατώτερη ατμόσφαιρα αποτελεί το μεταξύ των αγωγών διηλεκτρικό, μέσω του οποίου είναι δυνατή η διαρροή φορτίων που δίνουν το συνεχές ρεύμα από την ιονόσφαιρα προς τη γη.

5.3 Γένεση και διαχωρισμός των φορτίων στα νέφη

Μετρήσεις σε κεραυνοφόρα νέφη δείχνουν ότι στα ψηλότερα επίπεδα του νέφους υπάρχουν συγκεντρωμένα θετικά φορτία και στα κατώτερα αρνητικά (Σχήμα 5.7). Αυτή είναι η μέση γενική κατάσταση. Αν λάβει κανείς υπόψη περισσότερες λεπτομέρειες, η εικόνα είναι πιο περίπλοκη. Π.χ., υπάρχει ένα δευτερεύον στρώμα αρνητικού φορτίου στην κορυφή του νέφους και ενός θετικού στη βάση του. Για τη γένεση και διαχωρισμό των φορτίων στα νέφη, υπάρχουν διάφορες θεωρίες και

προτεινόμενες εξηγήσεις. Το πρόβλημα ερευνάται ενεργώς. Εμείς εδώ δεν θα μπορούμε σε λεπτομέρειες και θα αναφέρουμε περιγραφικά ένα μόνο μηχανισμό δημιουργίας και διαχωρισμού φορτίων στα νέφη, που είναι γνωστός ως *μηχανισμός πόλωσης και βαρυτικού διαχωρισμού*.

Πιστεύεται ότι αυτός είναι ο κύριος μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την παρατηρούμενη ηλεκτρική εικόνα των καταιγιδο-φόρων νεφών, τα οποία, όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένα, χαρακτηρίζονται από ισχυρά ανοδικά ρεύματα.

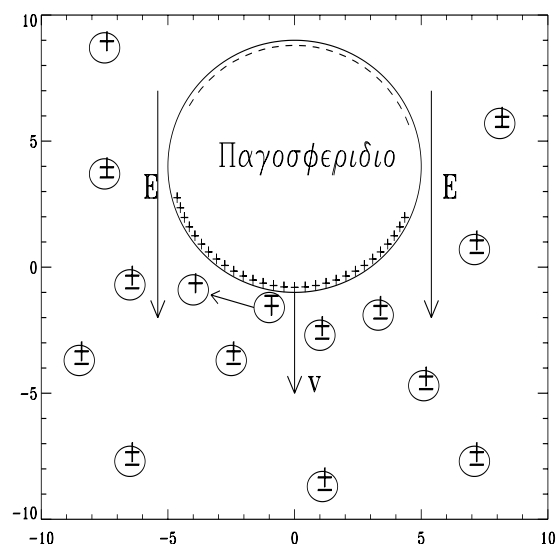
Η δημιουργία των φορτίων στα καταιγιδοφόρα νέφη, μέσω του μηχανισμού πόλωσης και βαρυτικού διαχωρισμού φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Βασίζεται στην ιδέα, ότι σχετικά μεγάλα παγοσφαιρίδια στα νέφη πολώνονται, από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου καλού καιρού, έτσι ώστε στο κάτω μέρος να έχουν θετικό και στο άνω αρνητικό φορτίο. Τώρα, όταν ένα σχετικά μεγάλο πολωμένο



Σχήμα 5.7 Καταιγιδοφόρο νέφος. Διακρίνονται τα κέντρα θετικού και αρνητικού φορτίου.

παγοσφαιρίδιο πέφτει μέσα στο νέφος και συγκρούεται με μικρότερα παγοσφαιρίδια, ηλεκτρόνια μεταφέρονται από τα μικρά σφαιρίδια στο μεγαλύτερο. Κατ'αυτόν τον τρόπο τα μικρά παγοσφαιρίδια φορτίζονται θετικά και παρασυρόμενα από τα ισχυρά ανοδικά ρεύματα μεταφέρονται, ως ελαφρότερα, προς τα ανώτερα στρώματα του νέφους, ενώ τα μεγαλύτερα, που με τις κρούσεις αυτές φορτίζονται αρνητικά, σαν βαρύτερα καταλήγουν στα κατώτερα στρώματα του νέφους, έτσι ώστε να δημιουργείται ένα στρώμα θετικού φορτίου στο επάνω μέρος του νέφους και ένα αρνητικού στο κάτω. Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο μηχανισμός είναι αυτοενισχυτικός, γιατί με το διαχωρισμό του φορτίου το αρχικό ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο ενισχύεται.

Αποτελέσματα μαθηματικών μοντέλων δείχνουν, ότι το ηλεκτρικό πεδίο κατά τα πρώτα 200 - 500 s αυξάνεται αργά, αλλά στα επόμενα 100-200s αυξάνεται ταχύτατα και



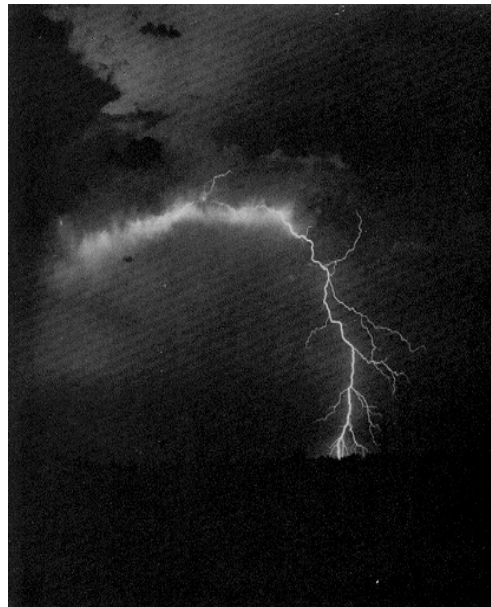
Σχήμα 5.8 Μηχανισμός δημιουργίας ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη, μέσω πόλωσης, συγκρούσεων και βαρυτικού διαχωρισμού.

μπορεί να πάρει τιμές της τάξης των 0.3-0.5 MV/m. Δηλαδή, το ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο νέφος γίνεται κατά πολύ μεγαλύτερο από το πεδίο καλού καιρού, έξω από το νέφος, και έχει την ίδια διεύθυνση με αυτό.

5.4 Ηλεκτρικές εκκένωσεις στην Ατμόσφαιρα. Κεραυνοί

Από το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων στα καταιγιδόφορα νέφη, οι διαφορές δυναμικού, (1) μεταξύ του εδάφους και της βάσης του νέφους, (2) μεταξύ των στρωμάτων θετικού και αρνητικού φορτίου εντός του νέφους, και (3) μεταξύ της κορυφής του νέφους και των ανωτέρων αγώγιμων στρωμάτων της ατμόσφαιρας, αυξάνονται μέχρις ότου λάβει χώρα διηλεκτρική κατάρρευση και ισχυρή ηλεκτρική εκκένωση, που είναι γνωστή σαν κεραυνός (Σχήμα 5.9). Σε ξηρό ατμοσφαιρικό αέρα διηλεκτρική κατάρρευση συμβαίνει όταν το ηλεκτρικό πεδίο φθάσει περί τα 3MV/m, ενώ για υγρό αέρα το πεδίο είναι μικρότερο. Κατά μέσο όρο, γύρω στα 20 με 30 Coulomb φορτίου μεταφέρονται σε κάθε ατμοσφαιρική ηλεκτρική εκκένωση. Μετά από μία εκκένωση, ένα ηλεκτρικά ενεργό νέφος μπορεί να ξαναφορτισθεί σε είκοσι περίπου δευτερόλεπτα.

Για να καταλάβουμε το φαινόμενο των κεραυνών, ας θυμηθούμε το μηχανισμό της ηλεκτρικής εκκένωσης στον αέρα μεταξύ των πλακών ενός φορτισμένου πυκνωτή. Ο σπινθήρας μπορεί να αρχίσει από ένα ζεύγος ιόντων στο χώρο μεταξύ των πλακών. Το αρνητικό ιόν επιταχύνεται προς τη θετική πλάκα και το θετικό προς την αρνητική. Το καθένα υφλισσταται ηλεκτρική δύναμη $F=qE$ η οποία του προσδίδει κινητική ενέργεια πριν συγκρουστεί με ένα ουδέτερο μόριο ή άτομο αέρα. Αν η κινητική ενέργεια του ιόντος υπερβαίνει το δυναμικό ιονισμού του μορίου τότε σαν αποτέλεσμα της σύγκρουσης μπορεί να δημιουργηθεί ένα νέο ζεύγος φορτίων, τα οποία υπό την επίδραση του πεδίου επιταχύνονται και συγκρούονται με άλλα μόρια αέρα, κοκ,



Σχήμα 5.9 Φωτογραφία κεραυνού νέφους-εδάφους.

μέχρις ότου, ο αριθμός των ιόντων αυξανόμενος γεωμετρικά, δημιουργεί ένα αγώγιμο δρόμο για την εκφόρτιση των πλακών. Η συνθήκη που απαιτείται για τη διηλεκτρική κατάρρευση του αέρα είναι η ύπαρξη ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, τέτοιου ώστε, σε απόσταση ίση με τη μέση ελεύθερη διαδρομή, τα επιταχυνόμενα ιόντα να αποκτούν κινητική ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη του δυναμικού ιονισμού των συστατικών ατόμων και μορίων του αέρα*.

Η αναλογία μεταξύ του σπινθήρα εκκένωσης σε ένα πυκνωτή και ένα κεραυνό είναι χονδρική, γιατί η ακολουθία των γεγονότων που λαβαίνει χώρα στους κεραυνούς δεν έχει προβλεφτεί θεωρητικά και δεν υπάρχει κοινώς αποδεκτή εξήγηση των λεπτομερειών του φαινομένου. Εδώ θα δώσουμε περιγραφικά μερικά στοιχεία

* Το δυναμικό ιονισμού ενός ατόμου υδρογόνου όταν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στη στοιβάδα με κύριο κβαντικό αριθμό n είναι: $2\pi^2 me^4 / h^2 n^2$, όπου e και m είναι το φορτίο και η μάζα του ηλεκτρονίου, αντίστοιχα, και h η σταθερά του Planck.

για τους κεραυνούς που αρχίζουν από τη βάση ενός νέφους και μεταφέρουν αρνητικό φορτίο στη γη.

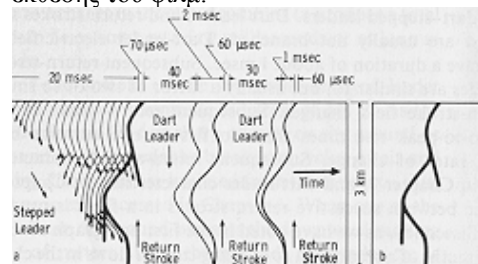
Παρόλο που το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται τη λάμψη του κεραυνού ως στιγμιαία, στην πραγματικότητα η ηλεκτρική εκκένωση προχωρεί σε χρονικά βήματα κατά πολύπλοκο αλλά και καθορισμένο τρόπο. Με μια ειδική φωτογραφική μηχανή (*Streak-camera*) στην οποία το φιλμ κινείται ταχύτατα, είναι δυνατόν να διακρίνουμε τα διάφορα στάδια μίας ατμοσφαιρικής ηλεκτρικής εκκένωσης. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας φωτογραφίας δίδεται στο Σχήμα 5.10α, ενώ το Σχήμα 5.9 δείχνει μία παρόμοια εκκένωση όπως φωτογραφήθηκε από μια κοινή φωτογραφική μηχανή.

Οι κερανοί νέφους - εδάφους, αρχίζουν με μια αδύνατη εκκένωση η οποία διαδίδεται από την αρνητική βάση του νέφους προς το έδαφος με βήματα της τάξης των 50 m και με χρονικές παύσεις περίπου 50μs (Σχ. 5.10α, αριστερά). Η λάμψη είναι ορατή μόνο κατά την κίνηση του βήματος που διαρκεί $\sim 1 \mu\text{s}$ και διαδίδεται με ταχύτητα $\sim 5 \times 10^5 \text{ m/s}$. Η σταδιακά προς τα κάτω κινούμενη εκκένωση αυτού του τύπου ονομάζεται *βηματοδηγός* (*Stepped leader*). Στην αρχή κάθε βήματος (Σχήμα 5.10β) ο βηματοδηγός διακλαδίζεται και οι καινούργιοι κλάδοι συνεχίζουν να κινούνται προς τα κάτω σε μια σειρά νέων βημάτων και διακλαδισμών. Μετά από $\sim 20 \text{ ms}$ η προς τα κάτω διάδοση της εκκένωσης φέρνει την αρχή του βηματοδηγού κοντά στο έδαφος, όπου και δημιουργούνται θετικά φορτία, εξ επαγωγής, ιδιαίτερα σε εδαφικές προεξοχές και υπερυψωμένα αντικείμενα. Όταν ο βηματοδηγός φτάσει σε απόσταση $\sim 50\text{-}10 \text{ m}$ από το έδαφος, ένας σπινθήρας, που ονομάζεται *ενωτική εκκένωση* (*connecting discharge*), αρχίζει να κινείται από το έδαφος προς το βηματοδηγό. Μόλις γίνει η συνάντηση βηματοδηγού ενωτικής εκκένωσης μεγάλοι αριθμοί αρνητικών ηλεκτρικών φορτίων μεταφέρονται από το νέφος στο έδαφος και, σε ελάχιστο χρόνο, μια ισχυρή λάμψη διαδίδεται προς τα πάνω μέχρι τη βάση του νέφους. Η εκκένωση αυτή είναι πολύ ισχυρότερη (μεταφέρει ρεύμα της τάξης των 10000A, διαδίδεται με ταχύτητα μεταξύ των 10^7 και 10^8 m/s και ονομάζεται *κτύπημα επιστροφής* (*return stroke*). Εντούτοις, παρά τη μεγάλη ροή ηλεκτρονίων προς το έδαφος, το έδαφος παραμένει θετικά φορτισμένο σε σχέση με την αρνητικότερη βάση του νέφους.

Η διεργασία της εκκένωσης μπορεί να τελειώσει μετά το κτύπημα επιστροφής. Συνήθως όμως συμβαίνει να έχουμε επανάληψη του φαινομένου μια ή και περισσότερες φορές. Στην περίπτωση αυτή, μερικά εκατοστά του δευτερολέπτου



Σχήμα 5.10α Φωτογραφία βηματοδηγού κεραυνού με Streak-camera (ειδική φωτογραφική μηχανή στην οποία το φιλμ κινείται με μεγάλη ταχύτητα έτσι ώστε να διακρίνονται τα διαδοχικά βήματα του οδηγού). Η ένταση του οδηγού (στην αριστερή πλευρά της φωτογραφίας) έχει αυξηθεί τεχνητά, αυξάνοντας το χρόνο της έκθεσης του φιλμ.



Σχήμα 5.10β Διαγραμματική περιγραφή των χαρακτηριστικών μιας αστραπής (από τη βάση ενός νέφους σε ύψος τριών χιλιομέτρων ως στο έδαφος) όπως καταγράφεται από μια Streak-camera. Ο χρόνος αυξάνει από τ' αριστερά προς τα δεξιά. Η κλίμακα του χρόνου είναι σκόπιμα παραμορφωμένη για καλύτερη διευκρίνιση του φαινομένου. Από τ' αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται: i) ο βηματοδηγός (*Stepped Leader*) και το πρώτο κτύπημα επιστροφής (*Return Stroke*), ii) δύο διαδοχικοί ακοντιοδηγοί (*Dart Leaders*) και δύο κτύπηματα επιστροφής, iii) το σύνολο αυτών των γεγονότων όπως φαίνεται στο γυμνό μάτι ή θα κατεγράφετο από μία κοινή φωτογραφική μηχανή.

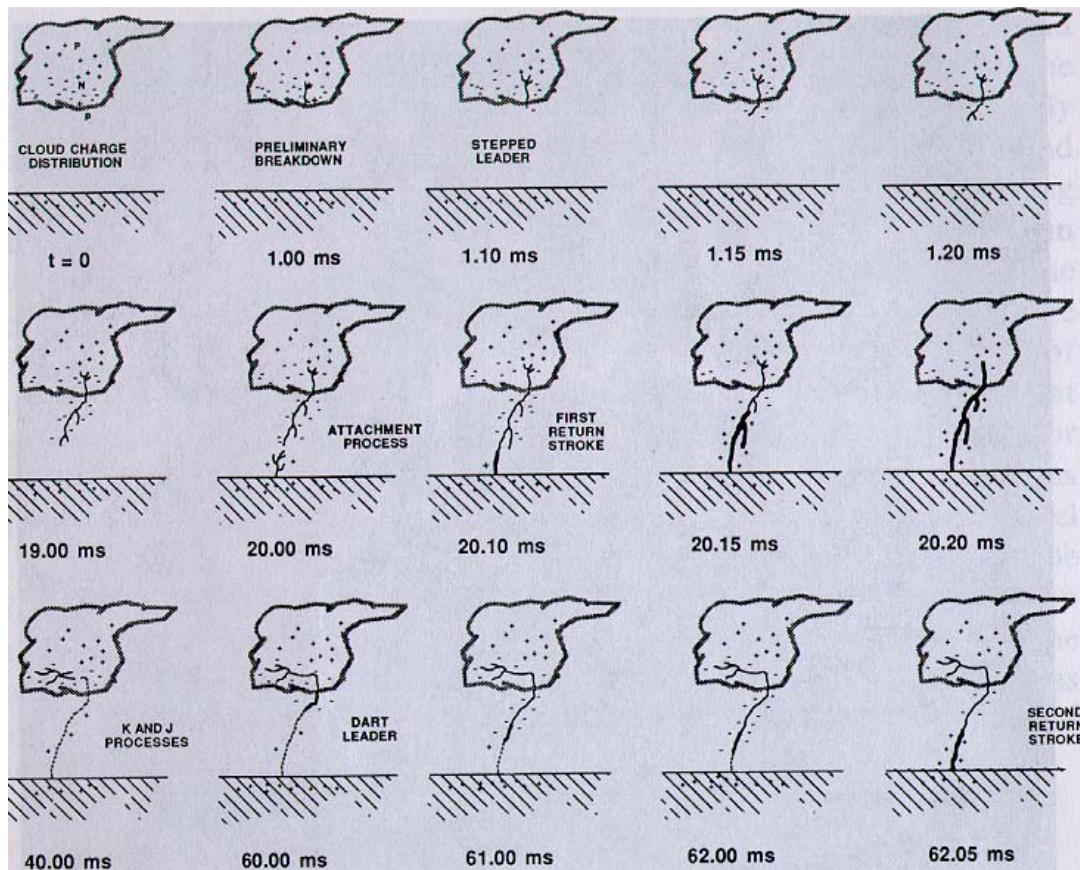
μετά από την πρώτη εκκένωση, αφού η βάση του νέφους επαναφορτισθεί σε ψηλό δυναμικό, μια νέα εκκένωση λαβαίνει χώρα, αρχίζοντας από το ίδιο σημείο που άρχισε ο πρώτος βηματοδηγός και φυσικά προτιμά να διαδίδεται μέσω του προϋπάρχοντος ιονισμένου καναλιού με ταχύτητα $\sim 2 \times 10^6$ m/s. Δηλαδή, περίπου 10 φορές ταχύτερα από το βηματοδηγό, αλλά περί τις 20 φορές βραδύτερα από το κτύπημα επιστροφής. Η δεύτερη αυτή εκκένωση ονομάζεται *ακοντιοδηγός* (*dart leader*), φτάνει στη γη σε ~ 2 ms, και αμέσως ακολουθείται από ένα νέο κτύπημα επιστροφής λιγότερο ισχυρό από το πρώτο. Η εκκένωση: ακοντιοδηγός-κτύπημα επιστροφής μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές (Σχήμα 5.11) μέχρις ότου το ιονισμένο κανάλι φθίνει και η όλη διαδικασία σταματά. Αυτό συμβαίνει όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ βάσης νέφους και εδάφους έχει μειωθεί σημαντικά από τη μεταφορά ηλεκτρονίων στο έδαφος.

Η διεργασία που περιγράψαμε ισχύει για *καθοδικούς κεραυνούς*, δηλαδή, για κεραυνούς που αρχίζουν από το νέφος προς έδαφος. Μερικές όμως φορές συμβαίνει ο βηματοδηγός να αρχίσει από το έδαφος, πχ, από ένα αλεξικέραυνο ή από μια αιχμή στην κορυφή ενός πύργου και να κινηθεί ανοδικά, διακλαδιζόμενος όμοια με τους καθοδικούς κεραυνούς, προς διάφορα σημεία της βάσης του νέφους. Στην περίπτωση αυτή έχουμε *ανοδική εκκένωση*. Όμως οι πιο συχνές ηλεκτρικές εκκενώσεις δεν είναι μεταξύ εδάφους και νέφους (ή αντίστροφα) αλλά μέσα στα νέφη (ενδονεφικές) μεταξύ του θετικού και του αρνητικού κέντρου φορτίων. Το φαινόμενο είναι ανάλογο με αυτό που περιγράφηκε προηγουμένα.

Ας ανακεφαλαιώσουμε εδώ μερικά στοιχεία πιο επεξηγηματικά. Η “πρώτη σπίθα” του βηματοδηγού είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται σε ηλεκτρική κατάρρευση στο χώρο μεταξύ δύο υδροβελονιδίων, που παίρνουν αυτό το σχήμα από το γεγονός ότι βρίσκονται σε ένα χώρο που το ηλεκτρικό πεδίο είναι πολύ ισχυρό (σε αυτό βοηθάει βέβαια και το γεγονός ότι τα μόρια νερού έχουν σχετικά ισχυρή διπολική ροπή). Η εκκένωση αρχίζει μέσω της επιτάχυνσης ιόντων και ηλεκτρονίων (που παράγονται από ιονίζουσες ακτινοβολίες, κοσμικής ή γήινης προέλευσης) από το ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο εξασκεί σε κάθε φορτισμένο σωματίο δύναμη qE μεταξύ κρούσεων. Τα ιόντα έχουν πολύ μεγαλύτερη μάζα από τα ηλεκτρόνια και συνεπώς επιταχυνόμενα λαμβάνουν αρκετά μικρότερες ταχύτητες από τα ηλεκτρόνια. Κατά βάση λοιπόν είναι τα ηλεκτρόνια υπεύθυνα για τη “χιονοστοιβάδα” των φορτίων που σχηματίζεται μέσω κρούσεων και ιονισμού κατά τη διάδοση του βηματοδηγού. Καθώς τα ηλεκτρόνια κινούνται αφήνουν πίσω τους ένα μεγάλο αριθμό ιόντων και διηγημένων ατόμων και μορίων, τα οποία, όταν επιστρέφουν στη βασική τους κατάσταση, εκπέμπουν φωτόνια, μερικά από τα οποία με τη σειρά τους προκαλούν φωτοιονισμό και περαιτέρω αύξηση των ηλεκτρονίων. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων αυξάνεται εκθετικά και η όλη διεργασία ενισχύεται. Βέβαια, τα θετικά ιόντα που



Σχήμα 5.11 Φωτογραφία κεραυνού με Streak-camera στην οποία διακρίνονται δώδεκα διαδοχικά κτύπηματα από τ' αριστερά προς τα δεξιά.. Η συνεχής εκπομπή φωτός μετά το ενδέκατο κτύπημα υποδηλώνει τη συνεχή ροή ρεύματος, για κάποιο χρονικό διάστημα, μετά από αυτό το κτύπημα.



Σχήμα 5.12 Διαγραμματική περιγραφή των διαδοχικών διαδικασιών, και των χαρακτηριστικών χρόνων όπου υπεισέρχονται, που απαρτίζουν μία αρνητική εκκένωση νέφους - εδάφους.

μένουν πίσω, δημιουργούν ένα θετικό φορτίο, του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο είναι αντίθετο προς το πρωτογενές πεδίο που επιταχύνει τα ηλεκτρόνια, έτσι ώστε να αντιδρά κατασταλτικά στην απεριόριστη αύξηση της χιονοστοιβάδας των ηλεκτρονίων.

Καθώς ο βηματοδηγός προχωρεί, ο ιονισμένος αγωγίμος δρόμος που δημιουργείται μεταφέρει προς τα κάτω το υψηλό δυναμικό του αρνητικού κέντρου του νέφους, όπως στην περίπτωση που η τάση του πόλου μιας μπαταρίας μεταφέρεται σε ένα άλλο ακροδέκτη μέσω ενός αγωγίμου σύρματος. Έτσι όταν το άκρο του βηματοδηγού πλησιάσει το έδαφος, το πεδίο αυξάνεται δραματικά, γιατί η απόσταση μεταξύ των φορτίων μειώνεται, και δημιουργεί μια νέα εκκένωση από το έδαφος προς τα πάνω. Καθώς η ενωτική αυτή εκκένωση προχωρεί προς τα πάνω μεταφέρει φυσικά το δυναμικό του εδάφους μαζί της. Συνεπώς, τελικά δημιουργείται μια πολύ υψηλή διαφορά δυναμικού, μεταξύ των δύο αντίθετα κινουμένων ιονισμένων άκρων, η οποία θέτει σε λειτουργία το κτύπημα επιστροφής, το οποίο χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλο ρεύμα από τη γη προς το νέφος, το οποίο οφείλεται στη μαζική μεταφορά ηλεκτρονίων από το νέφος προς τη γη. Κατά το κτύπημα επιστροφής έχουμε έντονη φωτεινότητα, φωτοϊονισμό και μεγάλη έκλυση θερμότητας. Το Σχήμα 5.12 συνοψίζει παραστατικά αυτά που αναφέραμε εδώ.

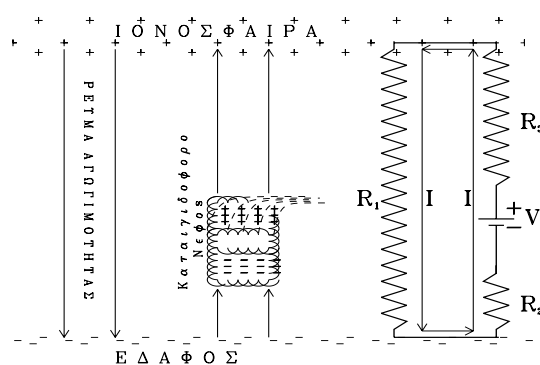
Πριν κλείσουμε την ενότητα θέμα των κεραυνών θα αναφέρουμε σύντομα δύο ακόμα θέματα, α) την προέλευση της βροντής, και β) τα ποσά ενέργειας που υπεισέρχονται.

Το κτύπημα επιστροφής, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, υψώνει τη θερμοκρασία του αέριου αγωγίμου καναλιού περί τους ~ 30.000 °C. Έτσι, λόγω αδράνειας, ο αέρας δεν έχει χρόνο να εκτονωθεί οπότε η πίεση (με βάση το νόμο $PV=RT$) αυξάνει στιγμιαία σε $\sim 10-100$ Atm. Το κανάλι αυτό της υψηλής πίεσης εκτονώνεται ταχύτατα προς τα έξω και δημιουργεί ένα κρουστικό κύμα (*shock wave*) που διαδίδεται στην ατμόσφαιρα με την ταχύτητα του ήχου και αποτελεί τη βροντή. Πλησίον του εδάφους, η ακτίνα εμβέλειας της βροντής είναι $\sim 20-25$ km. Το ηχητικό κύμα διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε θερμό απ'ότι σε ψυχρό αέρα και είναι δυνατόν να διαθλαστεί προς τα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Για αυτό πολλές φορές, αν και το ηχητικό κύμα διαδίδεται και πέραν των 25 km, δεν ακούγεται από ένα παρατηρητή στο έδαφος παρά το γεγονός ότι αυτός βρίσκεται σχετικά κοντά στον κεραυνό.

Οι μεγάλες ενέργειες που απελευθερώνονται από κεραυνούς δεν οφείλονται στο μέγεθος του μεταφερόμενου φορτίου αλλά στις υψηλές διαφορές δυναμικού, σε αντίθεση με τις καθημερινές εφαρμογές ηλεκτρισμού, όπου μεγάλες ποσότητες φορτίων διέρχονται μέσω αγωγών στα άκρα των οποίων εφαρμόζονται σχετικά μικρές διαφορές δυναμικού. Έτσι, μια ισχυρή ατμοσφαιρική εκκένωση μεταφέρει περί τα 30 Coulomb φορτίο, δηλαδή τόσο, όσο περνά μέσα από μια λάμπα 100W σε ένα λεπτό. Η διαφορά όμως δυναμικού (μεταξύ του εδάφους και του αρνητικού φορτίου στη βάση του νέφους), μπορεί να φτάσει τα 10^8 Volts, και επομένως η ηλεκτροστατική ενέργεια που απελευθερώνεται σε ένα κεραυνό είναι της τάξης των $30 \text{ C} \times 10^8 \text{ V} = 3 \times 10^9 \text{ J}$, που είναι ισοδύναμη της ενέργειας που χρειάζεται για να ανυψωθεί βάρος 3000 τόνων ~ 100 m πάνω από το έδαφος ή ίση με την ενέργεια που καταναλίσκει μια λάμπα 100 W σε ένα χρόνο.

5.5 Ισοζύγιο ηλεκτρικών ρευμάτων στην ατμόσφαιρα

Αναφέραμε προηγουμένως ότι υπάρχει ένα ρεύμα διαρροής από τα ανώτερα αγωγίμα ατμοσφαιρικά στρώματα προς τη γη, που ονομάζεται ρεύμα αγωγιμότητας, το οποίο τείνει να εκφορτίσει τον πυκνωτή γη-ιονόσφαιρα και να ουδετεροποιήσει το φορτίο της γης. Όμως, όπως φαίνεται από μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην επιφάνεια της γης, κατά μέσο όρο το φορτίο της γης παραμένει σταθερό. Αυτό είναι δυνατό μόνο όταν υπάρχει ένα αντίθετο ρεύμα που κατευθύνεται από τη γη προς την ιονόσφαιρα ίσο κατά μέσο όρο με το ρεύμα αγωγιμότητας. Το ρεύμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα καταιγιδοφόρα νέφη ενεργούν σαν τεράστιες ηλεκτροστατικές γεννήτριες, που δημιουργούν ισχυρές διαφορές δυναμικού στην ατμόσφαιρα και συνεπώς ροή φορτίων. Στις περιοχές πάνω και κάτω από ένα καταιγιδοφόρο νέφος, το ηλεκτρικό πεδίο αλλάζει πολικότητα σε σχέση μ'αυτό του καλού καιρού και κατά συνέπεια αλλάζει διεύθυνση και το ρεύμα.

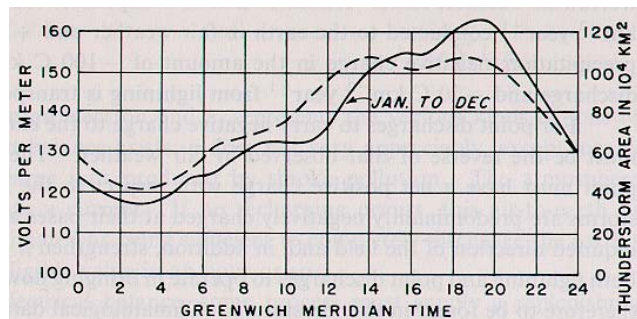


Σχήμα 5.13 Ατμοσφαιρικό Δυναμό: Ηλεκτρικά Πεδία, Φορτία, Ρεύματα, Αντιστάσεις και Ισοδύναμο κύκλωμα.

Η κατάσταση συνοψίζεται στο Σχήμα 5.13. Το αριστερό μέρος αντιστοιχεί σε περιοχές της γης που επικρατεί καλός καιρός και το δεξιό σε περιοχές καταιγίδων. Η μεγάλη συγκέντρωση φορτίων στο ανώτερο και κατώτερο μέρος του νέφους έχει σαν αποτέλεσμα την αντιστροφή του ηλεκτρικού πεδίου στις περιοχές αυτές.

Πάνω από το νέφος, το ρεύμα κατευθύνεται προς τα πάνω και οφείλεται κυρίως σε αρνητικά φορτία που κινούνται προς το κέντρο θετικών φορτίων του νέφους. Κάτω από το νέφος έχουμε επίσης ένα ρεύμα που κατευθύνεται προς τα πάνω, είτε λόγω μεταφοράς θετικών ιόντων προς το αρνητικό κέντρο του νέφους είτε αρνητικών φορτίων προς τη γη. Η μετακίνηση φορτίων αυξάνει από τους κεραυνούς. Μέσα στο νέφος υπάρχει ένα αντίθετο ρεύμα διαρροής (προς τα κάτω), μεταξύ των δύο κέντρων φορτίων, που εξαρτάται από την αγωγιμότητα στο νέφος. Το ρεύμα αυτό πρέπει να αφαιρεθεί από το ρεύμα φορτίσεως από το έδαφος προς την ιονόσφαιρα. Η παραπάνω εικόνα ισχύει για όλα τα καταιγιδοφόρα νέφη, και, αθροιστικά σε όλη τη γη, αποτελεί το μηχανισμό φόρτισης που διατηρεί τον πυκνωτή γη-ιονόσφαιρα φορτισμένο.

Αν η θεωρία αυτή είναι σωστή, θα πρέπει να υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ της καταιγιδοφόρου δραστηριότητας και του ηλεκτρικού πεδίου καλού καιρού σε όλο τον πλανήτη. Πράγματι έχει βρεθεί ότι υπάρχει καλή θετική συσχέτιση μεταξύ της μέσης ημερήσιας μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου και της έκτασης των καταιγίδων, εφόσον ο μέσος όρος λαμβάνεται για αρκετά μεγάλα



Σχήμα 5.14. Μέσο ηλεκτρικό πεδίο (συνεχής καμπύλη) και εμβαδόν καταιγίδων (διακεκομμένη) υπεράνω της γήινης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου Greenwich (Universal Time) κατά τη διάρκεια της ημέρας

χρονικά διαστήματα. (Σχήμα 5.14). Η συσχέτιση όμως αυτή δεν είναι ικανοποιητική για μικρότερα χρονικά διαστήματα, γεγονός που δείχνει ότι το φαινόμενο του ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού δεν έχει ακόμα πλήρως κατανοηθεί.

Κεφάλαιο 5. Ασκήσεις

1. Υποθέστε ότι σε ένα καταγιδοφόρο νέφος στα κέντρα των φορτίων σε αυτό έχουμε $+50\text{ C}$ στο πάνω μέρος και -50 C στο κάτω μέρος του νέφους. Υπολογίστε το ηλεκτρικό πεδίο στο μέσον της απόστασης μεταξύ των δύο κέντρων όταν: α) τα φορτία κατανέμονται σε δύο λεπτά κυκλικά στρώματα ακτίνας 5 km όταν η απόσταση των "αγωγίμων" αυτών στρωμάτων είναι πολύ μικρότερη της έκτασης των στρωμάτων. β) Τα φορτία κατανέμονται σφαιρικά γύρω από δύο κέντρα τα οποία απέχουν 2 km μεταξύ των.
2. Υποθέστε ότι στα πρώτα 200 m πάνω από το έδαφος, η αριθμητική πυκνότητα φορτίου χώρου εκφράζεται σε αριθμό στοιχειωδών φορτίων ανά cm^{-3} και δίνεται από τη σχέση $n = 20.4 \exp(-0.00452z)$, όπου z είναι σε m . Βρείτε α) τις σχέσεις $E = f(z)$ και $V = f(z)$ μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού με το ύψος και, β) υπολογίστε τα ρ , E , V στο ύψος $z = 200\text{ m}$ όταν στην επιφάνεια $E_0 = -120\text{ V/m}$ και $V_0 = 0\text{ V}$. (Θεωρείστε μικρά ιόντα το καθένα των οποίων έχει φορτίο ίσο με το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο)
3. Μια ηλεκτρικά αγωγή σφαίρα με ηλεκτρικό φορτίο Q_0 είναι μονωμένη από το έδαφος και εκτίθεται στον αέρα. Ο αέρας κοντά στην επιφάνεια της γης έχει αγωγιμότητα $\lambda = 2 \times 10^{-14}\text{ }\Omega\text{m}^{-1}$ που παραμένει σταθερή. Βρείτε: α) Μια έκφραση για την απόσβεση του Q ως συνάρτηση του χρόνου, β) τον χρόνο τ για τον οποίο $Q(\tau) = 0.5 Q_0$.
4. Εάν η κινητικότητα των μικρών ατμοσφαιρικών ιόντων είναι $k \cong 1.5 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{Vs}$ και οι συγκεντρώσεις των αρνητικών και θετικών ιόντων ίσες με 1000 cm^{-3} , βρείτε: α) την αγωγιμότητα του αέρα λ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, β) το ρεύμα αγωγιμότητας j σε A/m^2 , γ) την μάζα m των μικρών ιόντων, και δ) να συγκρίνετε την μάζα αυτή με την μάζα του ιόντος H_3O^+ (H_2O) $_n$ όταν $n=40$. (Δίνεται: $E = -120\text{ V/m}$, $T = 293\text{ }^\circ\text{K}$, μέση ελεύθερη διαδρομή $l=10^{-7}\text{ m}$, και ότι το φορτίο των ιόντων είναι ίσο με το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο).
5. Σ' ένα κεραυνό η μέγιστη τιμή του ρεύματος (κατά το "κύπημα επιστροφής") είναι 10^4 A . Να βρεθεί η ηλεκτρική ισχύς όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ νέφους και εδάφους είναι 10^8 V . Ποια είναι η μέση ενέργεια και ισχύς κατά τη διάρκεια των 0.2 s του κεραυνού, όταν το συνολικό φορτίο που μεταφέρεται είναι 20 C ; Σε ποιο ύψος θα μπορούσε η ενέργεια αυτή να ανυψώσει μάζα ενός τόνου;