

Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος

Κων. Φ. Παπαστεφάνου

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα

ISBN 978-960-456-198-8

© Copyright, 2010, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Κωνσταντίνος Παπαστεφάνου

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία

Εκτύπωση

Βιβλιοδεσία

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

180 χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας

Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ:

Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΕΝΩΣΗ ΕΚΔΟΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:

Στοά του Βιβλίου (Πεσμαζόγλου 5), 105 64 Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210.3211.097

ΑΠΟΘΗΚΗ ΑΘΗΝΩΝ - ΠΩΛΗΣΗ ΧΟΝΔΡΙΚΗ:

Ασκληπιού 60, 114 71 Αθήνα

Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Η ύλη αυτού του βιβλίου είναι το αποτέλεσμα της πολυετούς (από το 2000) εμπειρίας που αποκτήθηκε στη διδασκαλία του μαθήματος «Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος». Στην αρχή ξεκίνησε με τη μορφή φοιτητικών σημειώσεων, γιατί αφορούσε και εξακολουθεί να αφορά τους φοιτητές του τμήματος Φυσικής, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.) και όχι μόνο. Θα έλεγα ότι ενδιαφέρει όλους τους επιστήμονες που δραστηριοποιούνται με κάθε τρόπο στο περιβάλλον και όχι μόνο. Ενδιαφέρει τον καθένα μας στην καθημερινή μας ζωή και στις διάφορες εκδηλώσεις μας, όπου κι αν γίνονται. Κι αυτό, γιατί η ραδιενέργεια, είτε φυσική είτε τεχνητή, σε κάθε μορφή του περιβάλλοντος, ατμόσφαιρα, υδάτινο (θάλασσες, ποτάμια, λίμνες, πισίνες) και χερσαίο περιβάλλον, είναι δυνατόν να μας εκθέσει σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας με συνέπειες που μπορεί να είναι ανεπανόρθωτες.

Αν θυμηθούμε το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl την 26η Απριλίου 1986 και τον πανικό από τη «ραδιενεργό βροχή» της 4ης, 5ης, μέχρι και της 11ης Μαΐου 1986, τα «μολυσμένα» με ραδιενέργεια προϊόντα της τροφικής αλυσίδας για αρκετό καιρό, τα εβαπορέ, το απαγορευτικό γκαζόν για να παίζουν τα παιδιά, τα δάση για τα πικ νικ μας και τα πάσης φύσεως θηράματα, και τα λιβάδια για τη βοσκή των ζώων, θα έχουμε μια μόνον εικόνα από την ραδιενεργό επιβάρυνση του περιβάλλοντος και την εξαιρετική σημασία του για την επιβίωσή μας. Αν πάμε πιο πίσω, στην 6η και την 9η Αυγούστου 1945, στη Χιροσίμα και το Ναγκασάκι και τα 400.000 θύματα από τη ραδιενέργεια του(ων) μανιταριού(ών), που βάρυνε υπερβολικά το περιβάλλον και άφησε τα ίχνη της να «περιπλανώνται» στον πλανήτη μέχρι σήμερα, θα αισθανθούμε σοκ και δέος από την «ισοπέδωση» του περιβάλλοντός μας. Παρά ταύτα, το περιβάλλον μπορεί να επανορθώσει, να «καθαρίζει», να εξαγνίζεται με τους διάφορους μηχανισμούς της φύσεως και να μας προσφέρεται ξανά και ξανά για να ζήσουμε σ' αυτό υγιεινά και ειρηνικά.

Το περιβάλλον, αυτό το τόσο σημαντικό και τόσο άγνωστο καμιά φορά, θα το γνωρίσουμε καλύτερα και από μια άλλη σκοπιά. Τη ραδιενεργειά του και τη συμπεριφορά της μέσα σ' αυτό. Θα μάθουμε πώς να μην το ρυπαίνουμε, αλλά και

να ξέρουμε να το ελέγχουμε σε αντίθετη περίπτωση, αφού, δυστυχώς, ο άνθρωπος αλόγιστα πολλές φορές γίνεται αιτία με τις διάφορες απορρίψεις των ραδιενεργών αποβλήτων από τη δραστηριότητα της Πυρηνικής Ενέργειας, να επιβαρυνεί το περιβάλλον του ανεπανόρθωτα. Πόσες θάλασσες «φιλοξενούν» βυθισμένα πυρηνοκίνητα υποβρύχια, αμερικανικά και σοβιετικά ή ρωσικά. Και πόσες πυρηνικές δοκιμές «δοκίμασαν» τις θάλασσές μας, σαν κι αυτήν του Νότιου Ειρηνικού, στις ατόλλες, τα γεμάτα μαγεία κοραλλιογενή νησιά, αυτόν τον επίγειο παράδεισο, που όμως γι' αυτόν τον λόγο έγιναν ακατοίκητα.

Ας είναι ένα καλό βοήθημα για τους φοιτητές μας και ένας χρήσιμος οδηγός του περιβάλλοντός μας για τον καθένα μας.

Κ. Παπαστεφάνου

11.2.2009

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1

Ραδιενέργεια της Ατμόσφαιρας

1.1. Εισαγωγή	13
1.2. Ραδιενέργεια της ατμόσφαιρας με κοσμογενετική προέλευση	14
1.3. Ραδιενέργεια της ατμόσφαιρας με γήινη προέλευση	19
1.4. Ανατολικό-δυτικό φαινόμενο (East-West effect) και φαινόμενο πλάτους (Latitudinal effect)	21
1.5. Μεταφορά ραδιενεργών ουσιών με ισότοπα στην ατμόσφαιρα: Ατμοσφαιρική διασπορά (Atmospheric dispersion)	23
1.6. Ατμοσφαιρική απόθεση ραδιενεργών ρύπων με ισότοπα	34
1.6.1. Ξηρή ή στερεά απόθεση (Dry deposition)	35
1.6.2. Υγρή απόθεση (Wet deposition)	36
1.6.3. Εναιώρηση (Resuspension)	37
1.6.4. Μεταφορά ραδιενεργών ρύπων από τον αέρα στα φυτά (Air-to-vegetation transfer)	39
1.6.5. Ραδιενεργά αεροσώλς (Radioactive aerosols)	40

Κεφάλαιο 2

Ραδιενέργεια υγρού-υδάτινου περιβάλλοντος (Aquatic environment)

2.1. Εισαγωγή	43
2.2. Ραδιενέργεια του θαλασσίου περιβάλλοντος (Marine environment)	44
2.3. Ραδιενέργεια στα παράκτια νερά και τα νερά των εκβολών των ποταμών	46
2.4. Ραδιενέργεια στα νερά των ποταμών και των λιμνών	47

2.5. Ραδιενέργεια στα νερά των γεωτρήσεων (πόσιμο νερό)	50
2.6. Ραδιενέργεια στα νερά των θερμών πηγών	50

Κεφάλαιο 3

Ραδιενέργεια χερσαίου περιβάλλοντος (Terrestrial environment)

3.1. Εισαγωγή	53
3.2. Ραδιενέργεια στο χώμα (soil)	53
3.3. Ραδιενέργεια σε βραχώδη εδάφη και ορυκτά	55
3.4. Μεταφορά ραδιενεργών ισοτόπων από το έδαφος στα φυτά (Soil-to-plant transfer)	57
3.5. Το Ραδόνιο στο έδαφος	60

Κεφάλαιο 4

Έλεγχος της ραδιενέργειας περιβάλλοντος

4.1 Εισαγωγή	63
4.2 Μέτρηση της ραδιενέργειας του αέρα	64
4.3 Μέτρηση της ραδιενέργειας στο νερό της βροχής	68
4.4 Μέτρηση της ραδιενέργειας στο χώμα και το γρασίδι	70

Κεφάλαιο 5

Ραδιενέργεια από τη δραστηριότητα των πυρηνικών αντιδραστήρων

5.1. Ραδιενέργεια παραγόμενη με τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων με κοινό νερό (Light-Water Reactors)	73
5.2. Ραδιενεργά απόβλητα (Radioactive wastes)	77
5.3. Ορυχεία Ουρανίου (Uranium mines)	78
5.4. Εμπλουτισμός Ουρανίου (Uranium enrichment)	79
5.5. Απεμπλουτισμένο Ουράνιο (Depleted Uranium)	81

Κεφάλαιο 6

Μόλυνση του περιβάλλοντος με ραδιενέργεια από πυρηνικά ατυχήματα

6.1. Εισαγωγή	83
6.2. Το πυρηνικό ατύχημα του Windscale	83
6.3. Το πυρηνικό ατύχημα του Three Mile Island, TMI	85
6.4. Το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl	87

Κεφάλαιο 7

Ραδιενέργεια από πυρηνικές εκρήξεις

7.1. Εισαγωγή	95
7.2. Φυσική θεώρηση των πυρηνικών εκρήξεων	96
7.3. Ραδιενεργό fallout	101

Κεφάλαιο 8

Δοσιμετρία περιβάλλοντος

8.1. Εισαγωγή	107
8.2. Όρια στην έκθεση για τους εκτιθέμενους στις ακτινοβολίες εκ της ασκήσεως του επαγγέλματος (occupational)	108
8.3. Όρια στην έκθεση (γενικός πληθυσμός)	114
8.4. Δόσεις στο περιβάλλον από πυρηνικές δοκιμές	115
α. Από εσωτερική ακτινοβόληση στους πνεύμονες	115
β. Από την εξωτερική ακτινοβολία	116

Εισαγωγή

Είναι περισσότερο από ένα αιώνα από τότε που ανακαλύφθηκε το φαινόμενο της φυσικής ραδιενέργειας, natural radioactivity (H. Becquerel, 1896, M. Curie και P. Curie, 1898), ήτοι της εκπομπής της ακτινοβολίας (radiation) από την ύλη. Ο H. Becquerel διατύπωσε την άποψη ότι το Ουράνιο (^{238}U) της φύσης, συστατικό της χημικής ενώσεως θειικό κάλιο-ουρανύλιο, $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$, ακτινοβολεί ένα είδος ακτινοβολίας «άγνωστης», που δεν προσδιόρισε τα στοιχεία της, («ακτινοβολίας Becquerel»). Οι M. και P. Curie ανακάλυψαν στο ορυκτό του πισσουρανίτη τα πρώτα ραδιενεργά ισότοπα, ήτοι το ^{226}Ra και το ^{210}Po . Η M. Curie προσδιόρισε τη φύση της «άγνωστης ακτινοβολίας» με την ονομασία άλφα-, βήτα- και γάμμα-ακτινοβολία, που εκπέμπουν οι πυρήνες των ατόμων της ύλης. Οι F. και I. Joliot-Curie, το 1934, έθεσαν τις βάσεις με την ανακάλυψη της τεχνητής ραδιενέργειας (technological radioactivity), με την παραγωγή του πρώτου τεχνητού ραδιενεργού ισότοπου, του ^{30}P . Λίγο αργότερα, το 1939, οι O. Hahn και F. Strassmann ανακάλυψαν το φαινόμενο της θερμοπυρηνικής σχάσης (thermonuclear fission). Στη συνέχεια, στις 2 Δεκεμβρίου 1942, στο Πανεπιστήμιο του Σικάγου (ΗΠΑ), ο E. Fermi και οι συνεργάτες του, επέτυχαν την πρώτη αυτοσυντήρητη αλυσωτή ή αλυσιδωτή πυρηνική αντίδραση. Ένα χρόνο αργότερα (1943) κατασκευάστηκε στο Ωκ Ρίτζ (Oak Ridge) της Πολιτείας Tennessee (ΗΠΑ) ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας στον κόσμο, ο αντιδραστήρας γραφίτη (Graphite Reactor), στον οποίο είχαν παραχθεί οι πρώτες ποσότητες του ενός γραμμαρίου πλουτωνίου (^{239}Pu) και χρησιμοποιήθηκε για να κατασκευασθεί το πρώτο πυρηνικό όπλο, η βόμβα της Χιροσίμα, η πτώση της οποίας (6 Αυγούστου 1945) και η έκρηξή της φόρτισαν το περιβάλλον με τεράστιες ποσότητες ραδιενέργειας (τεχνητή ραδιενέργεια). Το ίδιο συνέβη και με το ατύχημα του Chernobyl (Ουκρανία) στις 26 Απριλίου 1986 με την τήξη της «καρδιάς» και την έκρηξη που επακολούθησε στον αντιδραστήρα Chernobyl-4.

Ραδιενέργεια διαφεύγει στο περιβάλλον και από τη δραστηριότητα της πυρηνικής ενέργειας για ειρηνικούς σκοπούς και ειρηνικές εφαρμογές, π.χ. από πυρηνικούς σταθμούς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και από άλλες μονάδες επεξεργασίας διαφόρων ορυκτών και τα ορυχεία όπου εξάγονται, όπως είναι οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΑΗΣ) και τα ορυχεία λιγνίτη, οι φωσφο-

ρίτες και οι μονάδες επεξεργασίας τους για την παραγωγή φωσφορικών προϊόντων, όπως τα φωσφορικά λιπάσματα κ.ά.

Σήμερα στο περιβάλλον ανιχνεύονται ανάμικτα φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα και αυτό που ενδιαφέρει είναι να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις τους και οι ισοτοπικές αναλογίες τους, που καθορίζουν τόσο την περίοδο της γένεσης-παραγωγής τους, όσο και την εκάστοτε παρουσία τους και την πορεία τους στο περιβάλλον. Ενδιαφέρει, συνήθως, ο τρόπος μεταφοράς των ραδιενεργών ισωτόπων στο περιβάλλον, ο τρόπος με τον οποίο μερικά, κάποια από αυτά εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα, το πόσιμο νερό και τον αέρα της αναπνοής.

Η **ραδιενέργεια περιβάλλοντος** μπορεί να διακριθεί ως **ραδιενέργεια της ατμόσφαιρας ή του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος** (atmospheric environment), τροποσφαιρικής ή στρατοσφαιρικής προέλευσης, ως **ραδιενέργεια του υγρού ή υδάτινου περιβάλλοντος** (aquatic environment), ήτοι των ποταμών, των λιμνών και των θαλασσών (marine environment) και τέλος ως **ραδιενέργεια του χερσαίου περιβάλλοντος** (terrestrial environment), ήτοι του στερεού φλοιού της γης.

Ραδιενέργεια της Ατμόσφαιρας

1.1 Εισαγωγή

Μέχρι τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, οι ατμοσφαιρικοί ρυπαντές ανθρωπογενούς παραγωγής παράγονταν και επεκτείνονταν από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι ύψους 1000 μέτρων. Η εμφάνιση, όμως, και η ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας και ιδιαίτερα οι δοκιμές των πυρηνικών όπλων επέκτειναν το πρόβλημα και πέραν του ύψους των 1000 μέτρων σε ύψη μέχρι 30000 μέτρων ή και περισσότερο.

Ως γνωστόν, τα συστατικά της ατμόσφαιρας είναι: **Άζωτο**, N_2 σε ποσοστό $78.084 \pm 0.002\%$, **Οξυγόνο**, O_2 σε ποσοστό $20.946 \pm 0.002\%$, **Αργό**, Ar σε ποσοστό $0.934 \pm 0.001\%$, CO_2 σε ποσοστό $0.033 \pm 0.001\%$, το δε υπόλοιπο περιλαμβάνει τα στοιχεία He , Ne , Kr και Xe (ευγενή αέρια), το H_2 , το CH_4 και το N_2O σε ανιχνεύσιμες και μετρήσιμες συγκεντρώσεις. Η πυκνότητα του αέρα είναι περίπου 1.3 mg cm^{-3} ($0.001293 \text{ g cm}^{-3}$) στην επιφάνεια της γης, όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι 760 mm Hg. Η ατμόσφαιρα περιέχει σωματίδια αεροσώλς (aerosols) που προέρχονται από διάφορες πηγές. Επιπροσθέτως στους διάφορους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές που εισάγονται στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας (human activity), οι μετεωρίτες, η δραστηριότητα των ηφαιστειών (volcanic activity), οι καταιγίδες σκόνης, οι πυρκαϊές των δασών (forest fires) και τα υδροσταγονίδια από το θαλάσσιο περιβάλλον (sea spray) συνεισφέρουν με μεγάλες ποσότητες αερίων και εναιωρούμενων (εν αιωρήσει) στερεών σωματιδίων (resuspended solid particles).

Σωματίδια, κυρίως υδροσταγονίδια, όλων των προαναφερθέντων πηγών ή συσσωματώματα σωματιδίων (clusters) μπορούν να αποτελέσουν τον πυρήνα συγκεντρώσεως υλικού, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων, προσελκύνοντας και προσκολλώντας σ' αυτά άτομα ή πυρήνες ραδιενεργών ισotόπων, δημιουργώντας τα **ραδιενεργά αεροσώλς (radioactive aerosols**, Papastefanou 2008), βλέπε Κεφ. I, παρ. 1.6.5.

Ραδιενεργοί πυρήνες μπορούν να δημιουργηθούν στην ατμόσφαιρα με την αλληλεπίδραση της **κοσμικής ακτινοβολίας**, της νουκλεϊνικής της συνιστώσας, ήτοι των πρωτονίων και των νετρονίων, με τα στοιχεία της ατμόσφαιρας που προαναφέρθηκαν, όπως του Αζώτου ($Z=7$), του Οξυγόνου ($Z=8$), του Αργού ($Z=18$), ακόμη και του Άνθρακα ($Z=6$) του διοξειδίου του άνθρακα, ή και βαρύτερων πυρήνων, όπως π.χ. πυρήνων Fe ($Z=26$), Co ($Z=27$) και Ni ($Z=28$), ως προϊόντα **αντιδράσεων θρυμματισμού (spallation reactions)**. Στην κατηγορία αυτή είναι το Τρίτιο, ^3H , ο Άνθρακας-14, ^{14}C , το ^7Be το ^{22}Na , το ^{26}Al , ο ^{32}P , το ^{35}S κ.ά. (NCRP 1987).

Εκτός της ανωτέρω περιπτώσεως, ραδιενεργά ισότοπα που παράγονται εντός του στερεού φλοιού τη γης μπορούν να εισέρχονται στην ατμόσφαιρα με την απορροή τους από το έδαφος, όπως συμβαίνει π.χ. με το ραδόνιο, ^{222}Rn , ή το θορόνιο, ^{220}Rn , και στη συνέχεια τα προϊόντα της ραδιενεργού διασπάσεώς τους, όπως ο ^{210}Pb και το ^{210}Po , είναι μεταξύ των ραδιενεργών συστατικών της ατμόσφαιρας (ραδιενέργεια της ατμόσφαιρας).

Επίσης, ραδιενεργά ισότοπα του στερεού φλοιού της γης, από την επιφάνεια, είναι δυνατόν, όταν πνέουν άνεμοι, να παρασύρονται και να «ντοπάρουν», στη συνέχεια, τον ατμοσφαιρικό αέρα με ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται στο χμά (resuspension), όπως π.χ. το ^{40}K , το ^{238}U , το ^{226}Ra και το ^{232}Th .

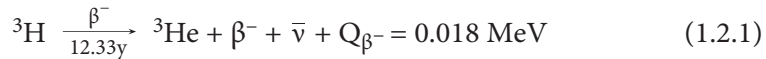
Τέλος, τα αέρια που διαφεύγουν από τις καμινάδες διαφόρων μονάδων, ήτοι εργοστασίων επεξεργασίας υλικών γήινης προέλευσης είναι δυνατόν να περιέχουν ραδιενεργά ισότοπα που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα και αναμειγνύονται με ποικίλους τρόπους με τα συστατικά της ατμόσφαιρας και μεταφέρονται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τις πηγές παραγωγής τους (**ατμοσφαιρική διασπορά, atmospheric dispersion**). Στην περίπτωση αυτή περιλαμβάνονται οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΑΗΣ), τα εργοστάσια φωσφορικών λιπασμάτων (φωσφορικές βιομηχανίες), οι πυρηνικοί σταθμοί κ.ά.

1.2

Ραδιενέργεια της ατμόσφαιρας με κοσμογενετική προέλευση

Δύο ραδιενεργά ισότοπα ελαφρών πυρήνων, με κοσμογενετική προέλευση, που υφίστανται στην ατμόσφαιρα, είναι το **Τρίτιο**, ^3H και ο **Άνθρακας-14**, ^{14}C . Το Τρίτιο που ανιχνεύεται στο νερό (H_2O) της βροχής σε αναλογία 10^{-18} , ήτοι $1:10^{18}$, ως προς το κοινό υδρογόνο (^1H), είναι προϊόν της νετρονικής ενεργοποίησης των δύο άλλων ισωτόπων του υδρογόνου, ήτοι του ^1H , που η φυσική ισοτοπική του αναλογία είναι 99.985% και του ^2H , του Δευτερίου, που η φυσική ισοτοπική του αναλογία είναι 0.0148%.

Το **Τρίτιο** παράγεται και διασπάται αενάως στην ατμόσφαιρα κατά το σχήμα:

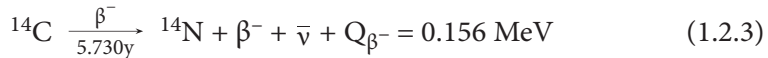


Ο **Άνθρακας-14** παράγεται στην ατμόσφαιρα με (n,p) αντίδραση της νετρονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας με το άζωτο της ατμόσφαιρας, ως εξής:



ή σε πολύ μικρότερο βαθμό ως προϊόν της νετρονικής ενεργοποίησης του ${}^{12}\text{C}$ και του ${}^{13}\text{C}$ του CO_2 της ατμόσφαιρας. Η φυσική ισοτοπική αναλογία των δύο σταθερών ισοτόπων του άνθρακα C είναι 98.99% του ${}^{12}\text{C}$ και 1.11% του ${}^{13}\text{C}$.

Ο Άνθρακας-14 παράγεται και διασπάται αενάως στην ατμόσφαιρα κατά το σχήμα:



αναπαράγοντας το άζωτο της ατμόσφαιρας.

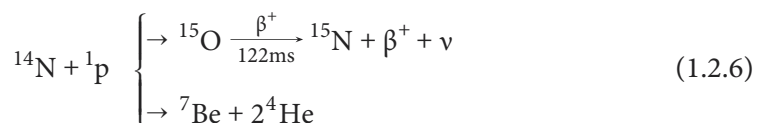
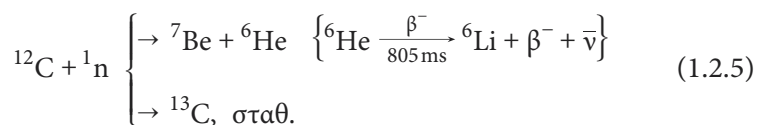
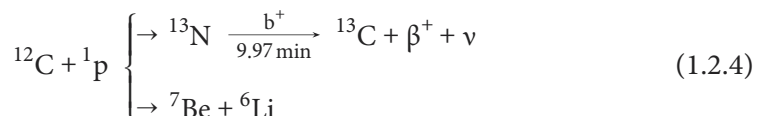
Ο άνθρακας-14 στην ατμόσφαιρα οξειδώνεται σε διοξείδιο του άνθρακα, CO_2 , το οποίο προσλαμβάνεται από τα φυτά και στη συνέχεια αποτελεί τροφή των ζώων. Έτσι, ο θάνατος των φυτών και των ζώων «εισάγει» οργανικό ${}^{14}\text{C}$ στο υδάτινο και το χερσαίο περιβάλλον, όπου παραμένει στο ενεργό ρεζερβουάρ (reservoir) και υφίσταται την αλληλεπίδραση των καιρικών φαινομένων και τις όποιες φυσικές και χημικές δράσεις, οι οποίες μπορούν να τον μετατρέψουν σε ανόργανες ανθρακικές ενώσεις ή σε αποθέσεις ανθρακικών που έχουν θαφτεί γεωλογικά, όπως το κάρβουνο ή το πετρέλαιο, τα οποία συνιστούν ρεζερβουάρ εν αδρανεία. Ο περισσότερος άνθρακας τελικά φθάνει στους ωκεανούς και με την εξάτμιση και τις βροχές, ως και με βιολογικές διεργασίες, αλλά και με την καύση στερεών καυσίμων, τη δραστηριότητα των ηφαιστείων και τα καιρικά φαινόμενα φθάνει ξανά στην ατμόσφαιρα.

Η καταγραφή του άνθρακα-14 σε παγκόσμια κλίμακα έδειξε ότι είναι $1.15 \times 10^{19} \text{ Bq}$ (310 MCi), αντιστοιχώντας σε 68.000 kg και κατανέμεται ως εξής:

- ◆ Βαθιά στις θάλασσες και τους ωκεανούς 91.7%
- ◆ Στα ιζήματα των θαλασσών και των ωκεανών 0.4%
- ◆ Στο άνω (επιφανειακό) στρώμα μείξης υδάτων των θαλασσών 2.2%
- ◆ Στην επιφάνεια του εδάφους 4%
- ◆ Στην τροπόσφαιρα 1.6%
- ◆ Στη στρατόσφαιρα 0.3%

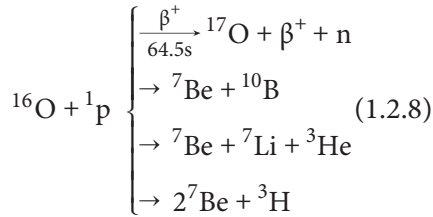
Η ποσότητα του ραδιοάνθρακα ^{14}C στο περιβάλλον επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Ο πλέον σημαντικός είναι οι πυρηνικές δοκιμές (weaprons tests), οι οποίες έχουν αυξήσει σημαντικά την ποσότητα του ^{14}C στο περιβάλλον, και η καύση των στερεών καυσίμων (fossil fuels) με την επακόλουθη παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα. Αν και η καύση των στερεών καυσίμων αυξάνει τη συνολική ποσότητα του ^{14}C στο περιβάλλον, η συγκέντρωση του ^{14}C μειώνεται ένεκα του μεγάλου χρόνου αποθήκευσης και παραμονής κάτω από το έδαφος (underground), με αποτέλεσμα τη μείωση της σχετικής συγκεντρώσεως του ^{14}C στον άνθρακα στην επιφάνεια της γης. Αυτό είναι γνωστό ως **φαινόμενο Suess (Suess effect)** από τον Hans Suess στο Πανεπιστήμιο του San Diego (California) που πρώτος το παρατήρησε και το περιέγραψε. Τον 19^ο αιώνα η συγκέντρωση του ^{14}C στην επιφάνεια της γης ήταν 0.22 Bq g^{-1} (6.1 pCi g^{-1}). Η καύση των στερεών καυσίμων μείωσε την ποσότητα αυτή κατά 3.2% το 1950 και κατά 7% το 1970, ενώ σύμφωνα με εκτιμήσεις το 2000 η συνολική μείωση από το φαινόμενο Suess πρέπει να ανήλθε στο 23%.

Ένα άλλο ραδιενεργό ισότοπο με κοσμογενετική προέλευση που παράγεται και υφίσταται αενάως στην ατμόσφαιρα είναι το ^7Be , το οποίο παράγεται με την αλληλεπίδραση της πρωτονικής και της νετρονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας με τα εξής στοιχεία της ατμόσφαιρας: ^{12}C του CO_2 της ατμόσφαιρας, του ^{14}N και του ^{16}O , σύμφωνα με τις **αντιδράσεις θρυμματισμού (spallation reactions)**:

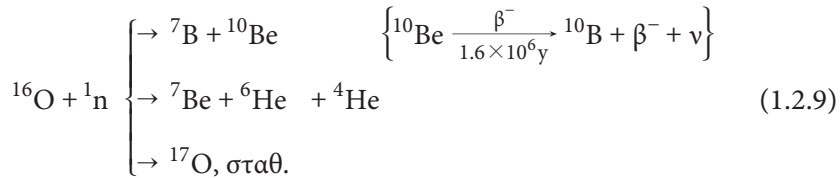


και





και



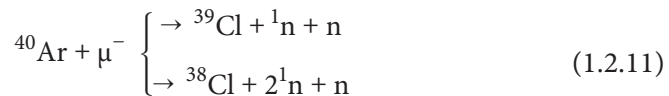
οπότε παράγεται και υφίσταται στο περιβάλλον το ${}^{10}\text{Be}$, λίαν μακρόβιο ραδιενεργό ισότοπο ($T_{1/2} = 1.6 \times 10^6 \text{ y}$).

Το ${}^7\text{Be}$ στην ατμόσφαιρα είναι σχετικά βραχύβιο ραδιενεργό ισότοπο ($T_{1/2} = 53.28 \text{ days}$ και $\tau = 1/\lambda = 77 \text{ days}$) και διασπάται κατά το σχήμα:



Το ${}^7\text{Be}$ είναι προϊόν **αντιδράσεων θρυμματισμού (spallation reactions)** και βαρύτερων πυρήνων του ${}^{16}\text{O}$, π.χ. του ${}^{40}\text{Ar}$.

Άλλα ραδιενεργά ισότοπα με κοσμογενετική προέλευση που παράγονται και ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα είναι το ${}^{22}\text{Na}$ ($T_{1/2} = 2.60 \text{ y}$), το ${}^{26}\text{Al}$ ($T_{1/2} = 7.3 \times 10^5 \text{ y}$), ο ${}^{32}\text{P}$ ($T_{1/2} = 14.28 \text{ d}$) και ο ${}^{33}\text{P}$ ($T_{1/2} = 25.3 \text{ d}$), το ${}^{35}\text{S}$ ($T_{1/2} = 87.2 \text{ d}$) και τα λίαν βραχύβια ισότοπα του χλωρίου, ήτοι το ${}^{38}\text{Cl}$ ($T_{1/2} = 37.2 \text{ min}$) και το ${}^{39}\text{Cl}$ ($T_{1/2} = 55.7 \text{ min}$) με τη δράση της μιονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας επί του ${}^{40}\text{Ar}$ της ατμόσφαιρας που είναι σταθερό ισότοπο, σύμφωνα με την αντίδραση:



Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σε ένα βαθμό και για σύντομο χρονικό διάστημα, περίπου μιας ώρας, η χλωρίωση του βρόχινου νερού.

Η φυσική ισοτοπική αναλογία του ${}^{40}\text{Ar}$ είναι 99.60% ως προς τα άλλα σταθερά ισότοπα του αργού στη φύση (0.337% ${}^{36}\text{Ar}$ και 0.063% ${}^{38}\text{Ar}$) και περίπου 1% στα συστατικά της ατμόσφαιρας.

Επιπλέον των ραδιενεργών ισωτόπων που προαναφέρθηκαν απαντώνται

στην ατμόσφαιρα, αναφέρονται και το ^{32}Si ($T_{1/2} = 280 \text{ y}$), ο ^{33}P ($T_{1/2} = 25.3 \text{ d}$), το ^{36}Cl ($T_{1/2} = 3.01 \times 10^5 \text{ y}$), το ^{37}Ar ($T_{1/2} = 34.8 \text{ d}$), το ^{39}Ar ($T_{1/2} = 269 \text{ y}$) και το ^{81}Kr ($T_{1/2} = 2.1 \times 10^5 \text{ y}$), εκ των οποίων άλλα είναι σχετικά βραχύβια και άλλα μακρόβια ραδιενεργά ισότοπα.

Όλα τα ανωτέρω ραδιενεργά ισότοπα, επειδή υφίστανται μονίμως και διαρκώς στην ατμόσφαιρα, λόγω της συνεχούς παραγωγής τους από τη δράση της κοσμικής ακτινοβολίας επί των υλικών της ατμόσφαιρας και δεδομένου ότι δεν αναμένεται η μεταβολή τόσο της εντάσεως όσο και της συνθέσεως της κοσμικής ακτινοβολίας για χιλιάδες ή εκατομμύρια χρόνια, θα εξακολουθήσουν να υπάρχουν σε σχετικές συγκεντρώσεις στην ίδια αναλογία με τον ίδιο ρυθμό παραγωγής.

Στον Πίνακα 1.1 δίδεται ο ρυθμός παραγωγής και η συγκέντρωση των ραδιενεργών ισωτόπων με κοσμογενετική προέλευση στην τροπόσφαιρα σε mBq m^{-3} .

Πίνακας 1.1. Ρυθμός παραγωγής και συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισωτόπων με κοσμογενετική προέλευση στην τροπόσφαιρα.

Ραδιοϊσότοπο	$T_{1/2}$	Ρυθμός παραγωγής (άτομα $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Συγκέντρωση στην τροπόσφαιρα (mBq m^{-3})
^3H	12.33 y	2500	1.4
^7Be	53.28 d	810	12.5
^{10}Be	$1.6 \times 10^6 \text{ y}$	450	0.15
^{14}C	5730 y	25000	56.3
^{22}Na	2.60 y	0.86	0.0021
^{26}Al	$7.3 \times 10^5 \text{ y}$	1.4	1.5×10^{-8}
^{32}Si	280 y	1.6	0.000025
^{32}P	14.28 d	8.1	0.27
^{33}P	25.3 d	6.8	0.15
^{35}S	87.2 d	14	0.16
^{36}Cl	$3.01 \times 10^5 \text{ y}$	11	9.3×10^{-8}
^{37}Ar	34.8 d	8.3	0.43
^{39}Ar	269 y	56	6.5
^{81}Kr	$2.1 \times 10^5 \text{ y}$	0.01	0.0012

1.3 Ραδιενέργεια της ατμόσφαιρας με γήινη προέλευση

Ραδιενεργά ισότοπα των φυσικών ραδιενεργών σειρών που υπάρχουν στον στερεό φλοιό της γης είναι δυνατόν να βρεθούν και ως εκ τούτου να υφίστανται για μεγάλο χρονικό διάστημα και φυσικά να ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερες των συγκεντρώσεων των ραδιενεργών ισωτόπων της ατμόσφαιρας με κοσμογενετική προέλευση, (παρ. 1.2), ήτοι σε $\mu\text{Bq m}^{-3}$. Με διάφορες ατμοσφαιρικές διεργασίες, κυρίως όταν φυσούν άνεμοι, παρασύρονται από την επιφάνεια του εδάφους και με τη μορφή στερεών σωματιδίων είναι δυνατόν να αναμειγνύονται με τον αέρα και να αποτελούν συστατικά του για μεγάλο χρονικό διάστημα. Βέβαια, τα μεγάλα σωματίδια πέτουν εύκολα και ταχύτατα λόγω βαρύτητας σε μικρές αποστάσεις, ενώ τα πολύ μικρά σωματίδια, ιδιαίτερα τα μικρότερα σε μέγεθος των 2-3 μm , είναι δυνατόν να μετακινούνται-μεταναστεύουν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, μέχρι περίπου 100 km, και έτσι να παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο αυτό καλείται **εναιώρηση (resuspension)** και θα αναφερθεί στην παρ. 1.6.3.

Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισωτόπων των φυσικών ραδιενεργών σειρών του **ουρανίου** (^{238}U), του **θορίου** (^{232}Th) και του **ακτινίου** (^{235}U), όπως και των προϊόντων της ραδιενεργού διασπάσεώς τους στον αέρα.

Πίνακας 1.2. Συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισωτόπων των φυσικών σειρών στον αέρα, ($\mu\text{Bq m}^{-3}$) (UNSCEAR 2000).

Ραδιοϊσότοπο	$T_{1/2}$	Συγκέντρωση
^{238}U (99.2746%)	$4.468 \times 10^9 \text{ y}$	1
^{230}Th	$7.7 \times 10^4 \text{ y}$	0.5
^{226}Ra	1600 y	1
^{210}Pb	22.3 y	500
^{210}Po	138.38 d	50
^{232}Th	$1.40 \times 10^{10} \text{ y}$	0.5
^{228}Ra	5.75 y	1
^{228}Th	1.913 y	1
^{235}U (0.720%)	$7.04 \times 10^8 \text{ y}$	0.05

Επισημαίνεται ότι τα ραδιενεργά ισότοπα ^{210}Pb και ^{210}Po του Πίνακα 1.2 είναι προϊόντα της ραδιενεργού διασπάσεως του ^{222}Rn (ραδονίου). Αναλυτικότερα για τις φυσικές σειρές του ουρανίου, του θορίου και του ακτινίου στο Κεφ. ΙΙΙ, παρ. 3.1 και 3.2.

Το **ραδόνιο**, ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3.82$ d), ραδιενεργό ισότοπο, προϊόν της ραδιενεργού διασπάσεως του ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1600$ y) που ανήκει στη φυσική σειρά του ουρανίου (^{238}U), το **θορόνιο**, ^{220}Rn ($T_{1/2} = 55.6$ s) ραδιενεργό ισότοπο, προϊόν της ραδιενεργού διασπάσεως του ^{224}Ra ($T_{1/2} = 3.66$ d) που ανήκει στη φυσική σειρά του θορίου (^{232}Th) και το **ακτινόνιο**, ^{219}Rn ($T_{1/2} = 3.96$ s) ραδιενεργό ισότοπο, προϊόν της ραδιενεργού διασπάσεως του ^{223}Ra ($T_{1/2} = 11.43$ d) που ανήκει στη φυσική σειρά του ακτινίου (^{235}U), όπως και τα προϊόντα των ραδιενεργών διασπάσεών τους, υφίστανται μονίμως και διαρκώς στην ατμόσφαιρα. Ο τρόπος με τον οποίο εισέρχονται στην ατμόσφαιρα από τη γη είναι η διάχυση διά μέσου των ρωγμών και των πόρων και η απορροή τους από την επιφάνεια του εδάφους. Το ραδόνιο ως μακροβιότερο μπορεί να προέρχεται από βαθύτερα στρώματα του εδάφους, έναντι του πολύ βραχύβιου θορονίου και του ακόμα πιο πολύ βραχύβιου ακτινίου, που προέρχονται από μικρά βάθη, καθ' όσον είναι δυνατόν να διασπαστούν καθ' οδόν προς την έξοδο από το έδαφος στην ατμόσφαιρα (βλέπε και Κεφ. ΙΙΙ, παρ. 3.5)

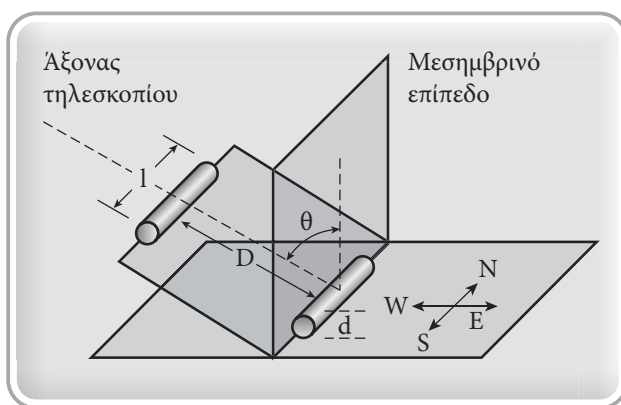
Έτσι, στην ατμόσφαιρα οι συγκεντρώσεις του ραδονίου και του θορονίου κυμαίνονται μεταξύ 8.1 και 11.1 Bq m^{-3} , με μέση τιμή τα 10 Bq m^{-3} . Το ακτινόνιο, ως λίαν βραχύβιο, δεν προλαβαίνει να εξέλθει από την επιφάνεια του εδάφους σε σημαντικές συγκεντρώσεις και γι' αυτόν τον λόγο δεν ανιχνεύεται εύκολα στην ατμόσφαιρα. Οι συγκεντρώσεις του ραδονίου και του θορονίου είναι δυνατόν να υφίστανται διακυμάνσεις, πολλές φορές έντονες, εξαρτώμενες από τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και παραμέτρους που είναι δυνατόν να επηρεάζουν την απορροή τους από την επιφάνεια του εδάφους, όπως η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, οι βροχοπτώσεις, το μέγεθος των σεισμών κ.ά. Αναλυτικότερα για το ραδόνιο στο Κεφ. ΙΙΙ, παρ. 3.4.

Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τη συγκέντρωση των ραδιενεργών ισότοπων στον αέρα, όπου διαβιούμε, εντός (indoors) ή εκτός (outdoors) της κατοικίας, καθ' όσον ο εισπνεόμενος αέρας στο 24/ωρο, κατά τη διάρκεια της 8/ωρης εργασίας είναι 10 m^3 ανά ημέρα και κατά τη διάρκεια των 16 ωρών ανάπαυσης και ψυχαγωγίας, της μη-εργασίας δηλαδή, είναι επίσης 10 m^3 ανά ημέρα, ήτοι συνολικά 20 m^3 το 24/ωρο.

1.4

Ανατολικό-δυτικό φαινόμενο (East-West effect) και φαινόμενο πλάτους (Latitudinal effect)

Κατά την ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων που υφίστανται στην ατμόσφαιρα τη στιγμή της ραδιενεργού διασπάσεώς τους εκπέμπονται σωματίδια-ακτινοβολίες, α , β ή γ , που είναι δυνατόν να ανιχνευτούν με απαριθμητές ή τηλεσκόπια απαριθμητών-ανιχνευτών πυρηνικών ακτινοβολιών. Τα τηλεσκόπια απαριθμητών είναι οριζόντια ή κατακόρυφα ή υπό γωνία (αζιμουθιακό τηλεσκόπιο) για την παρατήρηση και την όσο το δυνατόν καλύτερη σάρωση της κοσμικής ακτινοβολίας. (Σχ. 1.1).



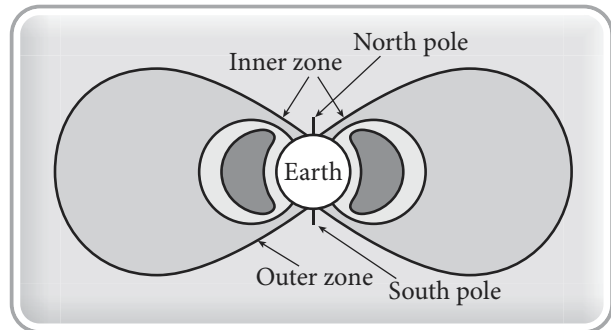
Σχ. 1.1. Τηλεσκόπιο απαριθμητών κοσμικής ακτινοβολίας.

Η κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από σωματίδια-ακτινοβολίες, ήτοι από πρωτόνια σε ποσοστό 87% και νετρόνια της νουκλεϊνικής συνιστώσας τα οποία με τα σωματίδια-ακτίνες άλφα (σε ποσοστό 11%) και πυρήνες με ατομικό αριθμό Z , μεταξύ 4 και 26 (σε ποσοστό 1%) αποτελούν την πρωτογενή δέσμη της κοσμικής ακτινοβολίας. Σε ποσοστό 1% είναι η δευτερογενής δέσμη της κοσμικής ακτινοβολίας, η οποία αποτελείται από τη μεσονική συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας, ήτοι πιόνια (π^+ , π^- και π^0) και μόνια (μ^+ και μ^-), καθώς και τη μαλακή συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας η οποία αποτελείται από ηλεκτρόνια (e^+ και e^-) και φωτόνια ακτίνων- γ (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Όπως είναι φανερό, υπάρχει υπεροχή του θετικού φορτίου στην κοσμική ακτινοβολία. Εξάλλου και τα άτομα που προκύπτουν κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων στιγμιαία είναι θετικά φορτισμένα (θετικά ιόντα), καθ' όσον τους λείπουν ηλεκτρόνια, ένα ή περισσότερα από ένα, μέχρι την εξουδετέρωσή τους με την πρόσληψη ελευθέρων ηλεκτρονίων. Τα πρωτόνια που είναι και τα πιο

πολλά (85%), αντιδρώντας με τα υλικά στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας σε πάχος ίσο προς 125 g cm^{-2} που ισοδυναμεί σε στήλη της ατμοσφαιρικής ύλης ύψους 13–15 km, παράγουν π-μεσόνια που έχουν μέσο χρόνο ζωής, $\tau = 2.2 \times 10^{-8}$ s, τα οποία στη συνέχεια διασπώνται σε μ-μεσόνια που έχουν μέσο χρόνο ζωής $\tau = 2.2 \times 10^{-6}$ s και διασπώνται σε ηλεκτρόνια.

Η υπεροχή των θετικών φορτίων (σωματιδίων) και η διεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου από νότο προς βορρά έχει ως αποτέλεσμα ο αριθμός των καταμετρομένων σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας ή και θετικά φορτισμένων ατόμων ραδιενεργών πυρήνων (θετικών ιόντων) τη στιγμή του σχηματισμού τους λόγω της διασπάσεως των ραδιενεργών πυρήνων, με διεύθυνση της κινήσεώς τους και συνεπώς της καταγραφής τους από δυσμών να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των σωματιδίων που προέρχονται από ανατολών (Σχ. 1.2α και 1.2β.). Το φαινόμενο αυτό καλείται **ανατολικό-δυτικό φαινόμενο (East-West effect)**. Η μελέτη του ανατολικού-δυτικού φαινομένου γίνεται με τηλεσκόπια απεριθμητών (Σχ. 1.1).



Σχ. 1.2α. Εκτροπή των φορτισμένων σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας λόγω του γεωμαγνητικού πεδίου.



Σχ. 1.2β. Κίνηση των θετικά φορτισμένων σωματιδίων στο επίπεδο του μαγνητικού ισημερινού της γης από νότο προς βορρά.

Το φορτίο των σωματιδίων σε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο της γης έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της εντάσεως της δέσμης των σωματιδίων από τους μαγνητικούς πόλους προς τον μαγνητικό ισημερινό. Αυτό είναι το **φαινόμενο πλάτους (Latitudinal effect)**.

1.5

Μεταφορά ραδιενεργών ουσιών με ισότοπα στην ατμόσφαιρα: Ατμοσφαιρική διασπορά

Όλοι οι πυρηνικοί σταθμοί που λειτουργούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και όχι μόνο, εκπέμπουν μικρές ποσότητες ραδιενεργών ουσιών με ισότοπα στην ατμόσφαιρα, ως επί το πλείστον αέρια προϊόντα της θερμοπυρηνικής σχάσης, κατά τη διάρκεια της ομαλής λειτουργίας τους. Αλλά και οι Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί, ΑΗΣ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που καίνε λιγνίτη, στερεό καύσιμο που περιέχει ραδιενεργά ισότοπα των φυσικών ραδιενεργών σειρών του ουρανίου (^{238}U), του θορίου (^{232}Th) και του ακτινίου (^{235}U), εκπέμπουν και αυτοί μικρές ποσότητες ραδιενεργών ουσιών με ισότοπα στην ατμόσφαιρα με τα αέρια της καύσεως κατά την ομαλή λειτουργία τους. Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, επιπλέον εκπέμπουν και τα οξείδια και διοξείδια του άνθρακα, του αζώτου και του θείου που συνιστούν τους χημικούς ρυπαντές στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Η εκπομπή των ραδιενεργών ουσιών και των χημικών ρύπων, όπως είναι φανερό, γίνεται με τις καμινάδες (stacks) των εργοστασίων, οι οποίες γι' αυτό τον λόγο είναι δυνατόν να παίρνουν ικανό ύψος, προκειμένου να γίνεται η μεταφορά των χημικών και των ραδιενεργών ρύπων και των αερίων της καύσεως εν γένει σε μεγάλες αποστάσεις από τους σταθμούς.

Η συγκέντρωση των ραδιενεργών ουσιών με ισότοπα (ραδιενεργοί ρύποι) που μεταφέρονται και διασπείρονται στην ατμόσφαιρα με τις καμινάδες σε διάφορες αποστάσεις από την εστία (τον σταθμό) που είναι η πηγή παραγωγής τους, ποικίλλει από σημείο σε σημείο περίξ του σταθμού ακτινικά και επηρεάζεται-εξαρτάται από τις καιρικές και μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στον τόπο του σταθμού. Έτσι, είναι δυνατόν να παρατηρούνται ημερήσιες (diurnal) μεταβολές στις συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ρύπων ή και εποχιακές μεταβολές (seasonal). Η μεταφορά των αερίων της καύσεως και συνεπώς και των ραδιενεργών ρύπων γίνεται με μορφή θυσάνων (plumes) κατά ριπές (πακέτα). Η αύξηση του ύψους της καμινάδας περιορίζει τις αναταράξεις (πορεία προς τα κάτω) του θυσάνου (Σχ. 1.3).



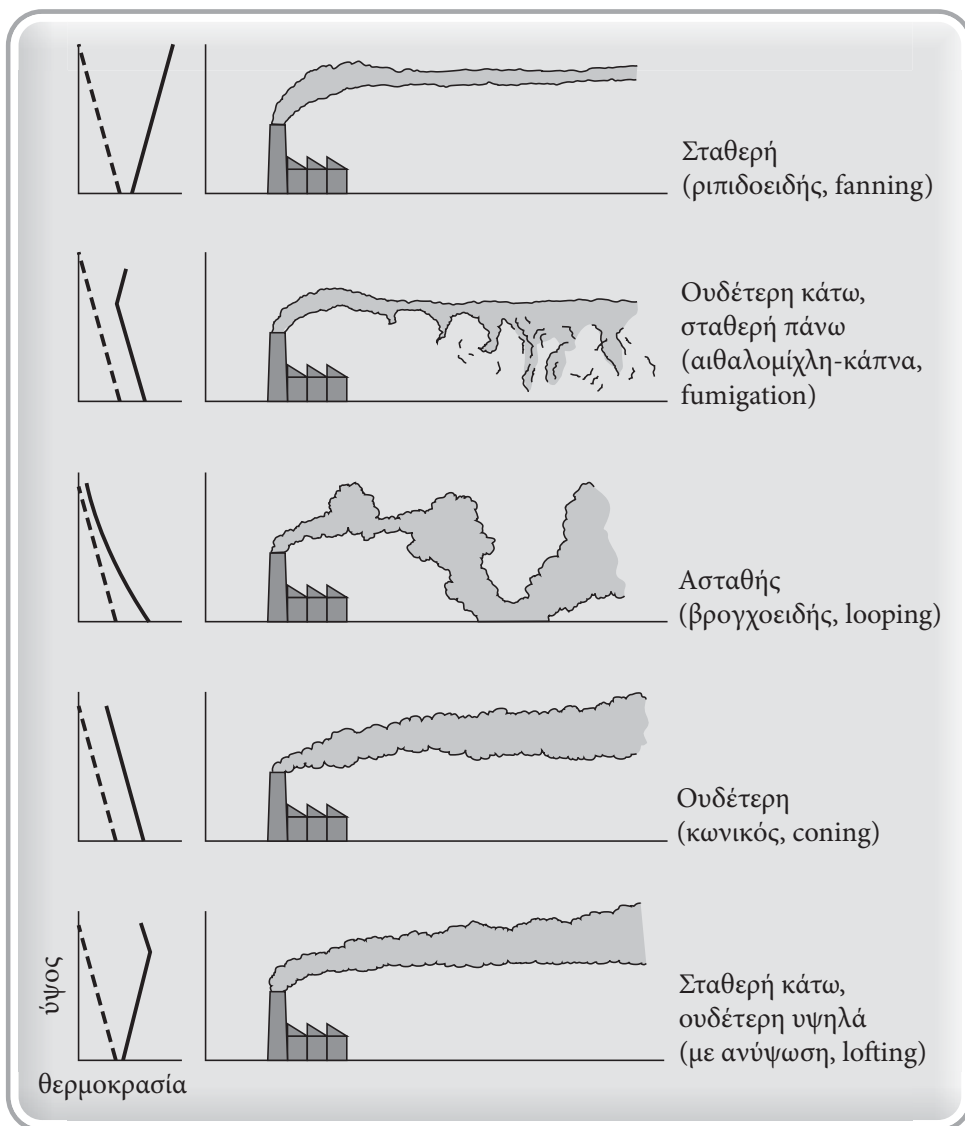
Σχ. 1.3. Αναταράξεις στους θυσάνους από καμινάδα πυρηνικού σταθμού.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει έντονα τους θυσάνους των αερίων που διαφεύγουν από τις καμινάδες των σταθμών και φυσικά τη συγκέντρωση των ρύπων που αποτίθενται στο έδαφος αφού διαχυθούν στην ατμόσφαιρα (Σχ. 1.4). Οι διακεκομμένες καμπύλες στην αριστερή στήλη του διαγράμματος του Σχ. 1.4 αντιστοιχούν σε αδιαβατικές μεταβολές, ενώ οι πλήρεις κύκλοι δείχνουν το πραγματικό περίγραμμα (προφίλ).

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες έχουν καθορισθεί από τον **F.Pasquill (1962)** και εξαρτώνται από τη σταθερή απόκλιση της οριζόντιας διεύθυνσεως του πνέοντος ανέμου στον τόπο του σταθμού και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3. Η γωνία σ_{θ} καθορίζεται από τη διεύθυνση που δείχνει σχετικός ανεμοδείκτης που ευρίσκεται στην καμινάδα εξόδου των αερίων.

Πίνακας 1.3. Κατηγορίες συνθηκών ατμοσφαιρικής σταθερότητας κατά Pasquill.

Κατηγορία	απόκλιση, σ_{θ}
A, άκρως ασταθής, extremely unstable	25°
B, μέτρια ασταθής, moderately unstable	20°
C, ελαφρώς ασταθής, slightly unstable	15°
D, ουδέτερη, neutral	10°
E, ελαφρώς σταθερή, slightly stable	5°
F, μέτρια σταθερή, moderately stable	2.5°
G, άκρως σταθερή, extremely stable	1.7°



Σχ. 1.4. Διάφορες μορφές θυσάνων των αερίων εξόδου από καμινάδα ενός πυρηνικού σταθμού στην ατμόσφαιρα για διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Έστω τώρα, χ είναι η συγκέντρωση ενός ραδιενεργού ισότοπου (ρύπου), που μεταφέρεται με τα αέρια της καύσεως από την έξοδο της καμινάδας ενός πυρηνικού σταθμού, σαν συνάρτηση των συντεταγμένων x, y, z και του χρόνου t . Η συγκέντρωση χ θα προσδιορίζεται από την εξαρτώμενη από τον χρόνο t διαφορική εξίσωση (νόμος του Fick), ήτοι