

ΕΠΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΡΑΔΙΟΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΘΡΑΚΑ-14

"Few aids to archaeological investigations can have contributed as much to our knowledge of the time scale of past events as the radiocarbon dating method".

Η ραδιοχρονολόγηση με άνθρακα-14 είναι μια τεχνική για τον προσδιορισμό, με αξιόλογη προσέγγιση, της ηλικίας αντικειμένων που ήταν κάποτε ζωντανή (κυρίως) ύλη. Η μέθοδος γεννήθηκε το 1946, όταν ο Willard F. Libby, στο πλαίσιο εργασιών επί των κοσμικών ακτίνων, πρόβλεψε τη δημιουργία στην ατμόσφαιρα του ραδιοϊσότοπου άνθρακα-14. Γρήγορα, αξιοποιώντας τις πρώτες ενδείξεις και πειράματα, κατέδειξε την προοπτική που ανοιγόταν με τη χρησιμοποίηση του άνθρακα-14 για τη χρονολόγηση.

Από τις πρώτες κιόλας εργασίες του Libby προκλήθηκε ενθουσιασμός και η αξία της μεθόδου (και του θεωρητικού υποβάθρου της) αναγνωρίστηκε επίσημα το 1960 με την απονομή στον επιστήμη της του βραβείου Nobel για τη Χημεία.

Το βραβείο τού δόθηκε "για τη μέθοδο του της εφαρμογής του άνθρακα-14 για τον προσδιορισμό της ηλικίας στην Αρχαιολογία, Γεωλογία, Γεωφυσική και άλλους κλάδους της επιστήμης". Τέτοιο ενδιαφέρον είχε προκαλέσει η μέθοδος, ώστε η επίσημη προσώφηση της απονομής του βραβείου ανέφερε: "Σπανίως μία και μόνη ανακάλυψη στη Χημεία επέδρασε τόσο έντονα στη σκέψη τόσο πολλών περιοχών της ανθρώπινης δραστηριότητας: σπανίως μία και μόνη ανακάλυψη προκάλεσε σε τέτοια έκταση το δημόσιο ενδιαφέρον".

Πολλοί αρχαιολόγοι δέχθηκαν, στην αρχή, τη μέθοδο σαν αλάβευτη πανάκεια. Δεν έλειψαν όμως οι επικρίσεις μόλις παρουσιάστηκαν οι πρώτες αδυναμίες της.

Η τεχνική της μεθόδου βελτιώθηκε, οι αδυναμίες της αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία, κατανοήθηκαν οι δυνατότητες και τα όριά της, και η χρησιμοποίησή της επεκτάθηκε σε πολλά υλικά. Σήμερα χρησιμοποιείται σε τέτοια έκταση, ώστε να υπάρχουν στον κόσμο πολλά εργαστήρια ραδιοχρονολόγησης με άνθρακα-14, και μάλιστα σε εμπορικό ανταγωνισμό μεταξύ τους. Και σε μας λειτουργεί, στο "Δημόκριτο", εργαστήριο ραδιοχρονολόγησης με άνθρακα-14.

Γιάννης Θ. Καλοπίσης

Προς επαναφορά στη μνήμη

Για την ευκολότερη κατανόηση όσων θα αναφερθούν για την ραδιοχρονολόγηση με τον άνθρακα-14, είναι αναγκαίο να υπομνησθούν ορισμένες θεμελιώδεις έννοιες, σύντομα και με τον απλούστερο δυνατό τρόπο.

1. Κάθε άτομο οποιουδήποτε χημικού στοιχείου αποτελείται από τον **πυρήνα** και τα **ηλεκτρόνια** που τον περιβάλλουν. Ο πυρήνας έχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια αρνητικό.

2. Ο πυρήνας αποτελείται από **πρωτόνια**, που έχουν θετικό ηλεκτρικό φορτίο, και από ουδέτερα, από ηλεκτρική άποψη, **νετρόνια**. Τα δύο αυτά συστατικά μαζί κάνουν τη **μάζα** (βάρος) του ατόμου.

3. Οι χημικές ιδιότητες των στοιχείων οφείλονται στα ηλεκτρόνια, που ο αριθμός τους είναι ο ίδιος με τον αριθμό των πρωτονίων.

4. Ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα ονομάζεται **ατομικός**

αριθμός και είναι η ταυτότητα του στοιχείου. Έτσι, πάντοτε ένας πυρήνας με 11 π.χ. πρωτόνια, δηλαδή με ατομικό αριθμό 11, σχηματίζει το στοιχείο νάτριο. Ένας με ατομικό αριθμό 6 σχηματίζει πάντα το στοιχείο άνθρακα.

5. Ισότοπα. Δύο ή περισσότεροι πυρήνες με τον ίδιο ατομικό αριθμό, επομένως πυρήνες του ίδιου στοιχείου, μπορεί να διαφέρουν ως προς τη **μάζα** τους. Στην περίπτωση αυτή έχουμε ποικιλίες του στοιχείου με διαφορετική **μάζα**, και επομένως (αφού ο αριθμός των πρωτονίων είναι ο ίδιος) με διαφορετικό αριθμό νετρονίων στον πυρήνα τους. Οι ποικιλίες αυτές ενός στοιχείου λέγονται **ισότοπα**. Στη φύση τα διάφορα στοιχεία είναι μίγματα ισότοπων. Τα ισότοπα ενός στοιχείου, έχοντας τον αυτό ατομικό αριθμό, και επομένως τον αυτό αριθμό ηλεκτρονίων, **δεν διαφέρουν στις χημικές τους ιδιότητες** (γι' αυτό δεν μπορεί να ξεχωριστούν με χημικές μεθόδους) και συμπεριφέρονται από χημική

άποψη κατά τον ίδιο τρόπο.

6. Τα **ισότοπα του άνθρακα**. Το στοιχείο άνθρακας είναι μίγμα τριών ισότοπων. Όλα βέβαια έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό, δηλαδή 6, και τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων. Έχουν όμως διαφορετικές **μάζες**: 12-13-14. Πρόκειται δηλαδή για τον άνθρακα-12, τον άνθρακα-13 και τον άνθρακα-14.

Ο άνθρακας-12 αποτελεί στο μίγμα των 3 ισότοπων τα 98,9%, ο άνθρακας-13 το 1,1%. **Ο άνθρακας-14 είναι το ισότοπο, στο οποίο θεμελιώνεται η μέθοδος της χρονολόγησης** και στο οποίο θα επανέλθουμε διεξοδικά. Η παρουσία του στο μίγμα των 3 ισότοπων είναι **απειροελάχιστη**.

7. **Ραδιενέργεια**. Οι πυρήνες ισότοπων μερικών στοιχείων έχουν την ιδιότητα, αυτόματα (αφ' εαυτών) και χωρίς να την προκαλεί, αλλά ούτε να μπορεί να την επηρεάσει, καμιά εξωτερική επενέργεια, να διασπώνται, αποβάλλοντας (εκπέμποντας) ορισμένα σωματίδια. Έτσι μετασχηματίζονται και **μετατρέπο-**

νται σε πυρήνες άλλων στοιχείων.

Το φαινόμενο ονομάζεται **ραδιενέργεια** και μετράμε για ραδιενεργούς πυρήνες, ραδιενεργά ισότοπα (ραδίοισότοπα), ραδιενεργά στοιχεία.

Η ραδιενέργεια είναι το γνωστότερο και πιο επιτυχημένο μέσο της "απόλυτης" χρονολόγησης. Πρέπει ιδιαίτερα να σημειωθεί πως το ισότοπο άνθραξ-14, για το οποίο ήδη έγινε λόγος, είναι **ραδιενεργό και ότι στην ιδιότητά αυτή στηρίζεται εξακριβωμένη η μέθοδος της ραδιοχρονολόγησης με άνθρακα-14** θα το λέμε, από δω και πέρα, ραδιάνθρακα.

Στη συνέχεια θα δούμε πώς γίνεται η διάκριση του ραδιάνθρακα.

Προέλευση και παραγωγή του ραδιάνθρακα

1. Η κοσμική ακτινοβολία, η οποία προέρχεται από το διάστημα, προκαλεί περίπλοκες αντιδράσεις με τους πυρήνες των αερίων συστατικών της ατμόσφαιρας, που καταλήγουν στο σχηματισμό και νετρονίων.

2. Ο ατμοσφαιρικός αέρας (ξηρός) αποτελείται κυρίως από άζωτο (75,51%)², οξυγόνο (23,14%) και διοξειδίο του άνθρακα (0,05%).

3. Αν νετρόνια, για την προέλευση των οποίων μιλήσαμε, συγκρουστούν με πυρήνες ατόμων του ατμοσφαιρικού αζώτου, μπορεί να αιχμαλωτιστούν ("να συλληφθούν") απ' αυτούς, και τότε οι πυρήνες αυτού του αζώτου, αποβάλλοντας πρωτόνια, μεταστοιχειώνονται σε πυρήνες του ισότοπου άνθρακα-14. Η σχετική αντίδραση, σχηματικά, μπορεί να γραφεί:

1 άζωτο + 1 νετρόνιο = 1 άνθραξ-14 + 1 πρωτόνιο

Το σχηματιζόμενο όμως ισότοπο άνθραξ-14 είναι, όπως ήδη ξέρουμε, ο ραδιενεργός ραδιάνθρακας.

Ο ραδιάνθρακας, ως ραδιενεργός, διασπάται (αυτόματα), δίνοντας πάλι άζωτο (από το οποίο γεννήθηκε σε πρώτη φάση), και ηλεκτρόνια. Η σχετική αντίδραση, σχηματικά, μπορεί να γραφεί:

1 ραδιάνθρακας = 1 άζωτο + 1 ηλεκτρόνιο

Έτσι ο ραδιάνθρακας δεν μπορεί να αυξάνεται απεριόριστα και φτάνει σε ένα επίπεδο ισορροπίας.

Ο παραγόμενος ραδιάνθρακας οξειδώνεται από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, γίνεται διοξειδίο του άνθρακα (με άνθρακα όμως ραδιενεργό) και αναμιγνύεται ολοκληρωτικά και ομοιόμορφα με το "κοινό" διοξειδίο του άνθρακα.

Υπολογίζεται πως κάθε χρόνο παράγονται στην ατμόσφαιρα περίπου 4,5 kg ραδιάνθρακα (και άλλα τόσα κιλά ραδιάνθρακα διασπώνται) και πως σε όλη τη Γη βρίσκονται, σε σταθερό επίπεδο ισορροπίας, περίπου 62 τόννοι, μόνο, ραδιάνθρακα. Το ποσό αυτό καταλήγει (ως διοξειδίο) ομοιόμορφα καταμεμημένο σε μία φανταστική γιγαντιαία δεξαμενή, που τμήματά της είναι η ατμόσφαιρα, οι ωκεανοί και οι ζωντανόι οργανισμοί (φυτά και ζώα) της ξηράς και της θάλασσας. Η δεξαμενή αυτή υπολογίζεται πως περιέχει συνολικά περίπου 40×10^{12} τόννους άνθρακα (40 τρισεκατομμύρια, δηλαδή το 14 ακολούθουμένο από 13 μηδενικά).

Έτσι η σχέση του ραδιάνθρακα προς το κύριο ισότοπο του άνθρακα, τον άνθρακα-12, σε όλα τα τμήματα της δεξαμενής, είναι περίπου 1 άτομο ραδιάνθρακα προς 10^{12} (1 τρισεκατομμύριο) άτομα άνθρακα-12. Το ότι μπορούμε να χειριζόμαστε τέτοιες απειροελάχιστες ποσότητες ραδιάνθρακα οφείλεται στο γεγονός της ραδιενεργού διάσπασής του, κατά την οποία εκπέμπει ηλεκτρόνια, που σχετικά εύκολα ανιχνεύουμε και μετράμε: Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπει ένα δείγμα είναι ανάλογος της ποσότητας του ραδιάνθρακα που περιέχει.

Τα ισότοπα του άνθρακα στα έμβια όντα

Είναι γνωστό ότι το σώμα των εμβίων όντων (ζώων και φυτών) είναι βασικά οικοδομημένο με υλικά οργανικές ενώσεις, που όλες τους είναι ενώσεις του άνθρακα. Ο άνθρακας είναι το δομικό στοιχείο της ζωής.

Ο άνθρακας φτάνει στα φυτά και τα ζώα χάρη στη λειτουργία της φωτοσύνθεσης, με την οποία τα

φυτά παίρνουν τον άνθρακα από το διοξειδίο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Τα φυτοφάγα ζώα τον παίρνουν άμεσα από τα φυτά με την τροφή τους. Τα σαρκοφάγα έμμεσα, τρεφόμενα από τα φυτοφάγα.

Απ' ό,τι ήδη είπαμε, το διοξειδίο του άνθρακα της ατμόσφαιρας είναι δύο ειδών: το ένα (ποσοτικά ελάχιστο) περιέχει ως άνθρακα ραδιάνθρακα και το άλλο τα δύο άλλα ισότοπα του άνθρακα.

Τα δύο είδη άνθρακα του διοξειδίου του άνθρακα, ως ισότοπα, έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες. Έτσι τα φυτά παίρνουν κατά την αφομοίωση το διοξειδίο του άνθρακα της ατμόσφαιρας, μην ξεχωρίζοντας τα μέρη του που περιέχουν ραδιάνθρακα από αυτά που έχουν τα άλλα ισότοπα.

Τα δύο είδη ισότοπων παίρνουν από τα φυτά στην ίδια ακριβώς αναλογία με την οποία υπάρχουν στο διοξειδίο του άνθρακα της ατμόσφαιρας.

Επίσης, κατά τις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών και των ζώων δεν μπορεί να γίνει καμιά διάκριση μεταξύ των δύο ειδών ισότοπων. Έτσι τελικά στα ζώα και τα φυτά ο άνθραξ βρίσκεται στις ίδιες αναλογίες ραδιάνθρακα και άνθρακα των άλλων ισότοπων, που βρίσκεται και στην ατμόσφαιρα (και στα άλλα τμήματα της δεξαμενής του άνθρακα). Η κατάσταση δεν αλλάζει με την ηλικία, γιατί ο άνθρακας ανανεώνεται συνεχώς (αφομοίωση-τροφή).

Τα πράγματα όμως αλλάζουν, όταν ο οργανισμός πεθάνει και δεν γίνεται πια αντικατάσταση (φωτοσύνθεση-τροφή) του ραδιάνθρακα, που συνεχώς διασπάται, προς άζωτο. Έτσι η συγκέντρωσή του ελαττώνεται συνεχώς και (όπως έχει υπολογιστεί) κάθε 5730 χρόνια απομεινεί η μισή, υποδιπλασιάζεται. Ο χρόνος αυτός, χαρακτηριστικός για τον ραδιάνθρακα, λέγεται **χρόνος υποδιπλασιασμού**.

Η πρακτική της ραδιοχρονολόγησης με τον ραδιάνθρακα

Η ραδιοχρονολόγηση με τον ραδιάνθρακα γίνεται τελικά με βάση ένα νόμο (το νόμο της δια-

σπάσως των ραδιενεργίων στοιχείων), σύμφωνα με τον οποίο, μετά τους αναγκαίους μαθηματικούς χειρισμούς, ο χρόνος που είναι αναγκαίος για να ελαττωθεί μια αρχική (κάποτε) ποσότητα ραδιάνθρακα Co σε σημερινή ποσότητα C δίνεται από τη σχέση:

$$t = \ln \frac{Co}{C} \times 8266,644 \quad (1)$$

Στην εξίσωση αυτή: t είναι ο ζητούμενος χρόνος (σε χρόνια) που πέρασε μέχρι σήμερα, από τον καιρό που η οργανική ύλη του δείγματος που θεωρούμε έπαψε να ζει. ln σημαίνει φυσικός λογάριθμος, Co είναι η συγκέντρωση (ποσότητα) του ραδιάνθρακα σε ένα σύγχρονο, ζωντανό δείγμα (δείγμα σύγχρονου ξύλου), και C είναι η συγκέντρωση του ραδιάνθρακα του δείγματος (όχι πια ζωντανού), του οποίου ζητούμε την ηλικία.

Έχουμε ήδη πει πως όλα τα υλικά ζωικής και φυτικής προέλευσης περιέχουν σε μικρά ποσά ραδιάνθρακα, που κατά την αυτόματη διάσπαση του εκπέμπει ηλεκτρόνια. Τις συγκεντρώσεις λοιπόν Co και C βρίσκουμε μετρώμενες με ειδικά όργανα και μετά από ορισμένη προπαρασκευή (που καταλήγει σε απομώνωσους του συνολικού άνθρακα του δείγματος) τον αριθμό των ηλεκτρονίων που εκπέμπουν τα δείγματα, και ο οποίος είναι, όπως ήδη έχει αναφερθεί, ανάλογος της συγκέντρωσης του ραδιάνθρακα στα δείγματα. Ο διαδοχασμός βέβαια αυτός δεν είναι τόσο απλός όσο αυτών, και γίνονται από εξειδικευμένα εργαστήρια.

Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η παραδοχή ότι η **περιεκτικότητα του συνολικού άνθρακα σε ραδιάνθρακα** (δηλαδή η σχέση ραδιάνθρακα προς μη ραδιενεργό άνθρακα) **στα ζώα και στα φυτά (όπως και στα άλλα τμήματα της δεξαμενής του άνθρακα) ήταν ανέκαθεν η ίδια με τη σημερινή**. Έτσι, μετρώμενες σήμερα τι Co, είναι σα να μετράμε τη συγκέντρωση που είχε το δείγμα που μελετούμε **όταν ήταν ακόμη ζωντανό**.

Παράδειγμα. Έστω πως σε ένα κομμάτι ξύλο που βρέθηκε σε αρχαίο αιγυπτιακό τάφο μετρή-

σαμε εκπομπή 10 ηλεκτρονίων κατά πρώτο λεπτό και γραμμάριο συνολικού άνθρακα, δηλαδή C=10.

Σε δείγμα πρόσφατου ξύλου έστω ότι μετρήσαμε 15 ηλεκτρόνια κατά πρώτο λεπτό και γραμμάριο συνολικού άνθρακα, δηλαδή Co=15.

Ζητείται ο χρόνος που πέρασε από την εποχή που κόπηκε (έπαψε να ζει) το αρχαίο ξύλο μέχρι σήμερα και επομένως, με μεγάλη προσέγγιση, η ηλικία του τάφου και πότε πέθανε ο ενταφιασμένος.

Από τη σχέση (1) έχουμε:

$$t = \ln (15/10) \times 8266,644.$$

Εκτελώντας τις πράξεις βρίσκουμε: t=3352 χρόνια από σήμερα (δηλαδή 3352 - 1993 = 1359 π.Χ.).

Αν η C που μετρήσαμε ήταν 1 ηλεκτρόνιο, ο ζητούμενος χρόνος θα ήταν:

$$t = \ln (15/1) \times 8266,644$$

Δηλαδή t= 22.386 χρόνια.

Στατιστική διακύμανση

Το φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης (άρα και της διάσπασης του ραδιάνθρακα) είναι διεργασία αυτόματη, που δεν υπόκειται δηλαδή στο νόμο της αιτιότητας, αλλά κυριαρχείται από τους νόμους των πιθανοτήτων.

Έτσι οι μετρήσεις των ηλεκτρονίων σε μια ποσότητα άνθρακα (δηλαδή οι τιμές Co και C του τύπου (1)), από τις οποίες υπολογίζεται ο χρόνος t) υπόκεινται σε "εγγενές" στατιστικό σφάλμα. Αν η μέτρηση γίνει πολλές φορές, δε θα βρεθεί πάντοτε η ίδια τιμή, αλλά τιμές που θα κυμαίνονται γύρω από ένα μέσον όρο. Δεν πρόκειται όμως για λάθος με την κοινή έννοια, αλλά για αναπόφευκτο "στατιστικό σφάλμα", που η τιμή του υπολογίζεται με τις μεθόδους του λογισμού των πιθανοτήτων και μετράει (παρέχει) την αξιοπιστία του αποτελέσματος.

Έτσι μια χρονολόγηση με ραδιάνθρακα, όπως και με οποιαδήποτε άλλο ραδιενεργό στοιχείο, για να είναι αξιόπιστη, οφείλει να συνοδεύεται με το στατιστικό της σφάλμα, το οποίο πρέπει να διευκρινιστεί πως δεν έχει σχέση με ενδεχόμενα λάθη από άλλες αιτίες και πηγές.

Όταν λέμε πως το αποτέλεσμα μιας χρονολόγησης με ραδιάνθρακα είναι π.χ. 4740±90 χρόνια, το 90 αναφέρεται στο στατιστικό μέσο σφάλμα και σημαίνει ότι η αληθινή τιμή βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 4740-90 και 4740+90 (δηλαδή μεταξύ 4650-4830) χρόνια, με **πιθανότητα περίπου 68%**. Ακόμη, το 90 σημαίνει πως η πιθανότητα να βρίσκεται 4740±290, δηλαδή μεταξύ 4560 και 4920, είναι περίπου 96%.

Βέβαια, πολλούς ενοχλεί η αβεβαιότητα τέτοιων χρονολογήσεων, αλλά δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε το μέτρο της αξιοπιστίας της προσδιοριζόμενης χρονολογίας (γνωστό οριοσφάλματος), ενώ η αξιοπιστία των χρονολογήσεων με άλλες (μη ραδιοχρονολογικές μεθόδους) είναι, σε πολλές περιπτώσεις, εντελώς άγνωστη.

Επιπλοκές - δυσκολίες

Η βασική υπόθεση και παραδοχή του Libby, ότι η περιεκτικότητα του συνολικού άνθρακα σε ραδιάνθρακα στα ζώα και στα φυτά, όπως και στα άλλα τμήματα της δεξαμενής του άνθρακα, ήταν πάντοτε σταθερή και ίδια με τη σημερινή, είχε πρώιμη και κατά μεγάλη προσέγγιση επιβεβαίωση από μετρήσεις που έκανε π.χ. για τους τάφους των Φαραώ Ζοσέρ και Σνεφρού, για τους οποίους υπήρχε ήδη αίγουρη χρονολόγηση από ιστορικά δεδομένα.

Με την πρόοδο όμως των ερευνών και τη χρησιμοποίηση όλου και περισσότερο εκλεπτυσμένων μεθόδων, ήρθαν σε φως γεγονότα που κλονίζουν τη βασική υπόθεση και παραδοχή του Libby. Έγινε αντιληπτό πως η μέθοδος για ορισμένους χρονικούς ορίζοντες οδηγούσε σε σφάλματα και εκατοντάδων ετών. Η κριτική που ασκήθηκε και οι τροποποιήσεις που κριθηκαν αναγκάσει δεν αδήγησαν όμως στην απόρριψη της μεγάλης αξίας της ως εργαλείου χρονολόγησης. Για όλες τις ανωμαλίες που παρατηρήθηκαν βρέθηκαν διορθωτικοί συντελεστές και τρόποι, που τις εξουδετερώνουν σε μεγάλο ή πολύ μεγάλο βαθμό.

Θα ήταν έξω από το πλαίσιο του άρθρου αυτού και πέραν των σκοπών του η λεπτομερής αναφορά της σειράς των λόγων στους οποίους οφείλονται οι δυσκολίες που συμβαίνουν. Συνοπτικά ως αναφερόμενοι μόνο οι εξής:

1. Η κατά καιρούς μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, που οφείλεται στη μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης και που ως αποτέλεσμα έχει τη μεταβολή της παραγωγής νετρονίων στην ατμόσφαιρα και, συνακόλουθα, της παραγωγής ραδιάνθρακα.

2. Η συνεχής επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με διοξείδιο του άνθρακα από την καύση των ορυκτών καυσίμων (άνθρακα, πετρελαίου, αερίου), που δεν προκαλεί μόνο το φαινόμενο του θερμοκηπίου αλλά και αραίωση της συγκέντρωσης του ραδιάνθρακα

3. Το αντίθετο φαινόμενο, του εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας με ραδιάνθρακα, που προέρχεται από το μεγάλο αριθμό νετρονίων που εξαιρέθηκαν οι δοκιμές στην ατμόσφαιρα των υδρογονικών βόμβων.

4. Ο ραδιάνθρακας (άνθρακας - 14) και τα δύο ελαφρύτερα ισότοπα του άνθρακα δεν διαφέρουν βέβαια από χημική άποψη. Υπάρχουν όμως μη χημική φυσικές διεργασίες, κατά τις οποίες η διαφορά στο βάρος έχει τη σημασία της. Έτσι, κατά την ανταλλαγή διοξειδίου του άνθρακα που γίνεται μεταξύ της ατμόσφαιρας και των υδατανών, το βαρύτερο ισότοπο ραδιάνθραξ (δηλαδή το διοξείδιο του άνθρακα με άνθρακα-14) ανεραιώνεται στην ατμόσφαιρα δυσκολότερα και έτσι "εμπλουτίζει" τη θάλασσα.

Αντίθετο φαινόμενο συμβαίνει στα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση. Θα επιμνησκόνταν πολύ το κείμενο αν γινόταν λεπτομερής αναφορά για τους ενδιαφερόντες τρόπους και τα μέσα που χρησιμοποιούνται για τις διορθώσεις ή την αποφυγή των λαθών των μετρήσεων, τα οποία δημιουργούνται από αίτια σαν αυτά που αναφέρθηκαν.

Πάντως, εξαιτίας των δυσκολιών που γεννιούνται, παρουσιάζονται στην ακρίβεια των χρονολογήσεων με ραδιάνθρακα σφάλματα τουλάχιστον ± 100 χρόνια, ανε-

ξήρητα από τη στατιστική διακρίση, για την οποία έγινε ήδη λόγος. Γι' αυτό, κύριο πεδίο της μεθόδου είναι η προϊστορία, για τους χρονικούς ορίζοντες της οποίας δεν παίζουν σημαντικό ρόλο μικρά σφάλματα, και όπου η συμβολή της μεθόδου είναι ανεκτίμητη.

Στη χώρα μας έχει χρησιμοποιηθεί επανειλημμένα η χρονολόγηση με ραδιάνθρακα για τη μελέτη προβλημάτων της προϊστορίας διαφόρων περιοχών. Ενδεικτικά αναφερόμαστε στις εργασίες που έχουν γίνει στη Σαντορίνη και στη θέση Μάνταλο της Δ. Μακεδονίας. (Βλέπε, Ch.

Doumas, K. Kotsakis et al., στα Πρακτικά του 25ου Διεθνούς Συμποσίου επί της Αρχαιολογίας, που έχουν εκδοθεί με τον τίτλο *Archaeometry* (Elsevier, 1989) από τον Γιάννη Μανιάτη).

Τεχνικές δυσκολίες

Η μέτρηση της ραδιενέργειας ενός δείγματος αρχαίου αντικείμενου (φυτικής ή ζωικής προέλευσης) και ενός σύγχρονου δείγματος και ο προσδιορισμός της ηλικίας του αρχαίου αντικείμενου με βάση τον τύπο (1) φάνονται πράγματα απλά. Στην πραγματικότητα όμως πρόκειται για δύσκολη, περιπλοκή και επίπονη διαδικασία.

Οι δυσκολίες προέρχονται από το γεγονός ότι η ραδιενέργεια του ραδιάνθρακα είναι πολύ ασθενής. Έτσι, για να έχουμε αξιοπistes μετρήσεις, είναι ανάγκη αυτές να διαρκούν πολύ χρόνο. Επιπλέον χρειάζονται όργανα μεγάλης ακριβείας και με ισχυρή αστάθην θωράκιση, προς αποκλεισμό των ακτίνων γάμμα και της κοσμικής ακτινοβολίας, που μπορεί να καταστρέψουν, με την παρεμβολή τους, τις μετρήσεις.

Άλλες δυσκολίες, αλλά βασικής σημασίας, προέρχονται από την κατάλληλη παρασκευή του δείγματος, στο οποίο θα γίνει η μέτρηση της ακτινοβολίας. Με χημικούς τρόπους πρέπει ν' απομονωθεί απ' το δείγμα όλος ο άνθρακας που χρησιμοποιείται αυτούσιος ή συνθεστέρα, για λόγους μεγαλύτερης ακριβείας των μετρήσεων, μετατρέποντάς τον σε μια αέριο ανθρακούχο

ουσία, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), ακετυλένιο (C_2H_2), μεθάνιο (CH_4).

Στις δυσκολίες πρέπει επίσης ν' αναφερθεί η ανάγκη, σε πολλές περιπτώσεις, μεγάλων δειγμάτων, πράγμα όχι εύκολο, εξαιτίας της εύλογης απροθυμίας των αρχαιολόγων να διαθέτουν μεγάλες ποσότητες πολύτιμων θησαυρών.

Εξαιτίας των δυσκολιών, που εντελώς ωχρά αποδόθηκαν, μόνο απολύτως εξειδικευμένα εργαστήρια ασχολούνται με χρονολογήσεις με ραδιάνθρακα.

Σημειώσεις

1. E. H. Willis: "Radiocarbon Dating", στο *Science in Archaeology*, edited by Don Brothwell et al., Thames and Hudson, London 1963.

2. Hans Hartmann: "Lexikon der Nobelpreisträger", Ullstein GmbH, Frankfurt/M-Berlin 1967.

3. Τα ποσοστά είναι κατά βάρος.

4. Η αντιμετώπιση των πρξένων δεν πρέπει να δημιουργεί αμηχανία. Με μια καλή μικρή αριθμομηχανή ("κομπιουτεράκι") είναι απλόστατο θέμα, λίγων δευτερολέπτων: Διαίρειτε το 15 με το 10, αφήνουμε το αποτέλεσμα γραμμένο, πατάμε το πλήκτρο με την ένδειξη $\ln x$ ή \ln , αφήνουμε πάλι το αποτέλεσμα στο μηχανήμα, και πολλαπλασιάζουμε επί 8266,844. Πατάμε το πλήκτρο "=" και έχουμε το 1.

5. Η συσκευή π.χ. ενός από τα ειδικά εργαστήρια ραδιοχρονολόγησης με ραδιάνθρακα ζυγίζει 23 τόνους.

The Radiocarbon-14 Dating Method

J. Kalopissis

The radiocarbon-14 dating method is a technique for the definition, with a significant accuracy, of the age of objects which once were mainly made of living material. This method was introduced in 1946, when Willard F. Libby, in the research framework on cosmic rays, predicted the creation of the radioisotopic carbon-14 in the atmosphere. Soon, by utilizing the first indications and experiments, he proved the emerging perspective from the use of the forementioned scientific procedure.

He was awarded with the Nobel prize for Chemistry "for his method of applying the carbon-14 for the definition of age in Archaeology, Geology, Geophysics and other scientific disciplines". Simplified information and data are presented in this article for the best understanding of this method.