

## **10. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ**

### **10.1 Ραδιενεργά ισότοπα και ακτινοβολίες στην ιατρική**

Η ανάπτυξη ραδιοεπισημασμένων βιοδραστικών ενώσεων κατάλληλων για χορήγηση στον άνθρωπο με σκοπό την εξειδικευμένη στόχευση παθήσεων για διάγνωση ή θεραπεία

### **10.2 Βιομηχανικές και τεχνολογικές εφαρμογές των ραδιενεργών ισότοπων και των ακτινοβολιών**

Ραδιενεργά ισότοπα και ακτινοβολίες χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την ανάλυση των πρώτων υλών και τον έλεγχο ποιότητας των προϊόντων, μέτρηση πάχους ελασμάτων, προσδιορισμό της υγρασίας), την αποστείρωση τροφίμων και ιατρικών προϊόντων και τον ραδιογραφικό έλεγχο συγκολήσεων.

### **10.3 Η ραδιοχρονολόγηση**

Μέχρι πριν 40 περίπου χρόνια οι αρχαιολόγοι βασιζόταν για τον υπολογισμό της ηλικίας ενός ευρήματος σε τυπολογικές συγκρίσεις και σε γραπτά κείμενα (π.χ. επιγραφές τάφων, λίστες ιερέων και κρατικών αξιωματούχων, χρονικά, αστρονομικές παρατηρήσεις). Αυτά κείμενα είναι πολλές φορές δύσκολα να ερμηνευθούν γιατί οι συγγραφείς δεν είχαν ως κύριο στόχο την καταγραφή ιστορικών δεδομένων. Πολλά άλλωστε ευρήματα προέρχονται από εποχές πριν την ανακάλυψη της γραφής. Αυτά τα προβλήματα χρονολόγησης έλυσε η επαναστατική μέθοδος του άνθρακα-14, που προτάθηκε από τον αμερικανό επιστήμονα Willard Libby το 1948. Για την ανακάλυψη αυτή, που επιτρέπει τη χρονολόγηση δειγμάτων ηλικίας μέχρι περίπου 50000 ετών, τιμήθηκε ο Libby με το

βραβείο Nobel το 1960.

Η γη είναι εκτεθημένη σ' ένα συνεχή καταιγισμό από σωματίδια υψηλής ενέργειας (κυρίως πρωτόνια), που προέρχονται από το διάστημα, την κοσμική ακτινοβολία. Τα σωματίδια αυτά συγκρουόμενα με μεγάλη ταχύτητα με τα συστατικά της ατμόσφαιρας δημιουργούν, μέσω πυρηνικών αντιδράσεων, νετρόνια και μία σειρά άλλων δευτερογενών σωματιδίων. Τα νετρόνια αυτά αλληλεπιδρώντας με το άζωτο της ατμόσφαιρας σχηματίζουν, σύμφωνα με την πυρηνική αντίδραση



το ραδιενεργό ισότοπο του άνθρακα, άνθρακα-14 ( $T_{1/2} = 5730$  χρόνια). Ο άνθρακας-14 διασπάται εκπέμποντας ακτινοβολία  $\beta$  ( $E_{\beta} = 0.016$  MeV), έχει τις ίδιες χημικές ιδιότητες με το γνωστό μας σταθερό άνθρακα (άνθρακα-12), εισέρχεται σ' όλους τους χημικούς και βιοχημικούς κύκλους και ενσωματώνεται σε κάθε είδος ζώντος οργανισμού με σταθερή αναλογία ίση μ' αυτή της ατμόσφαιρας ( $^{14}\text{C} : ^{12}\text{C} \approx 1.3 \times 10^{-12}$ ). Όταν ο ζωϊκός ή φυτικός οργανισμός σταματήσει να ζει τότε δεν προσλαμβάνει πλέον άλλον άνθρακα και η στιγμή του θανάτου του ξεκινά ένα «χρονόμετρο», που παρέχει χρονολογικές πληροφορίες.

Η μέτρηση της συγκέντρωσης του άνθρακα-14 γίνεται, μετά από καύση μικρής ποσότητας δείγματος, είτε με μέτρηση της ακτινοβολίας- $\beta$ , που εκπέμπει ή, με ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία μαζών σε επιταχυντές σωματιδίων (Accelerator Mass Spectrometry, A.M.S.), που ήδη αναφέθηκε. Με την κλασική μέθοδο μετρήσεως της ακτινοβολίας- $\beta$  μπορούν σήμερα να χρονολογηθούν δείγματα ηλικίας μέχρι 40000 ετών ενώ η φασματοσκοπία μαζών με επιταχυντές σωματιδίων επιτρέπει τη μελέτη δειγμάτων πολύ μεγαλύτερης ηλικίας. Σύγχρονα δείγματα άνθρακος παρουσιάζουν περίπου 13.5 διασπάσεις άνθρακα-14 ανά γραμμάριο και λεπτό ενώ ένα δείγμα 23000 ετών περίπου 1 διάσπαση ανά γραμμάριο και λεπτό. Το τελευταίο κάνει κατανοητή την αναγκαιότητα ιδιαίτερα προσεκτικής προετοιμασίας του δείγματος. Η μόλυνση του δείγματος των 23000 ετών με 1% σύγχρονο άνθρακα συνεπάγεται ένα σφάλμα προσδιορισμού περίπου 1300 ετών.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της ραδιοχρονολόγησης με  $^{14}\text{C}$  δεν είναι

πάντοτε εύκολη γιατί η παραγωγή του άνθρακα-14 επηρεάσθηκε τις τελευταίες δεκαετίες και επηρεάζεται ακόμη από πολλούς παράγοντες που αλλοιώνουν το λόγο  $^{14}\text{C} : ^{12}\text{C}$ . Οι κυριώτεροι από αυτούς είναι η ηλιακή δραστηριότητα, οι πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα, η κατανάλωση από τους ζώντες οργανισμούς θαλασσίας τροφής και η καύση άνθρακα ή πετρελαίου. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται διεθνώς ως σημείο αναφοράς των αποτελεσμάτων των μετρήσεων το έτος 1950. Ακριβείς διορθώσεις για τις εξάρσεις παραγωγής άνθρακα-14 γίνονται και **δενδροχρονολογικά** συνδέοντας άμεσα τον χρονικά καθορισμένο σχηματισμό των δακτυλίων στους κορμούς των δένδρων με τον ρυθμό παραγωγής του άνθρακα-14 στην ατμόσφαιρα. Έτσι, για παράδειγμα, η χρονολόγηση του ανθρώπου των Άλπεων, του Otzi, με A.M.S. έδωσε ηλικία  $4546 \pm 17$  BP (δηλ.  $4546 - 1950 = 2596$  π.Χ.) ενώ η διόρθωση της με δενδροχρονολόγηση τιμές περ. 650 χρόνια μεγαλύτερες<sup>1</sup>.

## 10.2 Τα ραδιενεργά ισotόπα και ακτινοβολίες στην υπηρεσία της τέχνης και της αρχαιολογίας.

Με την ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση έχει γίνει μία πληθώρα μελετών για την προέλευση κεραμικών, λόγω της διαφορετικής σύστασης του εδάφους κάθε περιοχής. Η τεχνική αυτή επίσης συνέβαλε στην αποκάλυψη ότι οι μεγάλιθοι του Stonehenge (~ 2300 BC, Ν. Αγγλία) προέρχονται από την περιοχή του Preseli Hills της Ουαλίας, που βρίσκεται περ. 240 χιλιόμετρα μακριά (Απεικ. 10.2, αριστερά). Ο τρόπος μεταφοράς αυτών μεγαλίθων δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμη. Με την ίδια τεχνική επιβεβαιώθηκε, συγκρίνοντας την περιεκτικότητα σε κοβάλτιο και σίδηρο, ότι οι μονόλιθοι βάρους 70 τν των αγαλμάτων του Φαραώ Αμενόφης ΙΙΙ (περ. 2500 π.Χ.) στην περιοχή των Θηβών (Άνω Αίγυπτος) προέρχονται από την περιοχή της Μέμφιδος (σημερινό Κάιρο) και μεταφέρθηκαν με πλοίο 600 χιλιόμετρα αντίθετα στο ρεύμα του Νείλου (Απεικ. 10.2, δεξιά). Μία μορφή νετρονικής ενεργοποίησης αποτελεί και η νετρονική ραδιογραφία κατά την οποία ένας πίνακας ζωγραφικής εκτίθεται για μικρό

<sup>1</sup> W. Kutschera, W. Rom, Otzi the prehistoric iceman, Nucl. Instr. Meth. B164 (2000) 12-22.

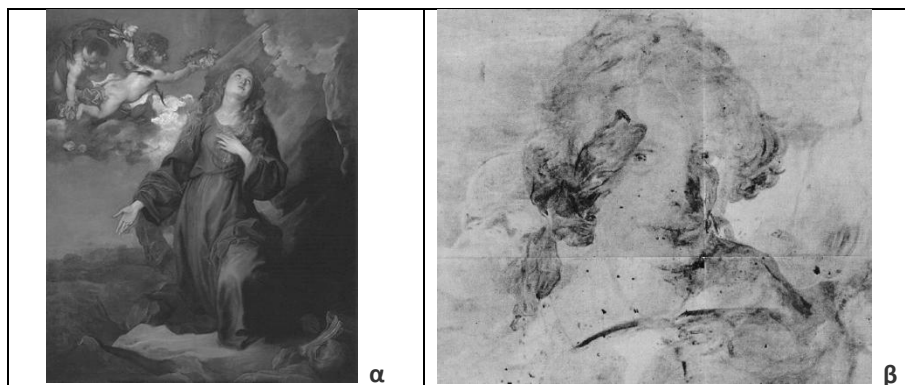


Απεικ. 10.2: Οι μονόλιθοι του Stonehenge (αριστερά) και τα μονολιθικά αγάλματα του Φαραώ Αμενόφης III (δεξιά)

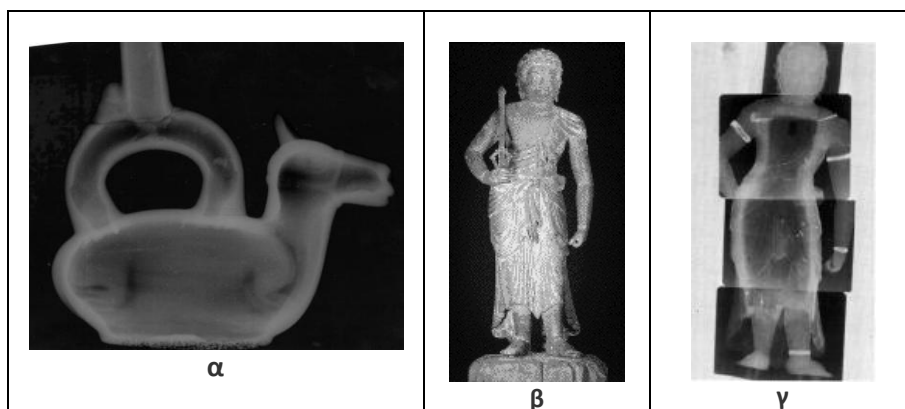
χρονικό διάστημα σε δέσμη θερμικών νετρονίων. Τα νετρόνια καθιστούν ορισμένα συστατικά του ραδιενεργά (π.χ. το φωσφόρο, που υπάρχει στο κάρβουνο σχεδίασης οργανικής προέλευσης ή το χαλκό και το κοβάλτιο, που είναι συστατικά χρωστικών). Η κάλυψη του πίνακα, μετά την έκθεση σε νετρόνια, με φωτογραφικό φιλμ επιφυλασσει πολλές φορές εκπλήξεις. Για παράδειγμα, κάτω από τον πίνακα του A. V. Dyck “Η Αγία Ροζαλία προσεύχεται για το Παλέρμο που πλήγηκε από τη χολέρα το 1624” κρυβόταν μία αυτοπροσωπογραφία του ζωγράφου (Απεικ. 10.3)<sup>2</sup>.

Η ραδιογραφία με ακτίνες-Χ, που αναπτύχθηκε κυρίως για ιατρικούς σκοπούς, συνεισφέρει στη διαπίστωση ρωγμών και ανομοιογενειών σε κεραμικά αντικείμενα τέχνης, στην εξακρίβωση της σύνδεσης των τμημάτων τους αλλά και προγενέστερων επεμβάσεων στη μορφή τους (Απεικ. 10.4). Η τομογραφία ακτίνων-Χ, που αναπτύχθηκε τη δεκαετία 1970 - 1980 έδωσε τη δυνατότητα συλλογής μίας μεγάλης ποσότητας πληροφοριών για μούμιες και το σκελετό τους όσο και για τα άλλα αντικείμενα, που υπήρχαν στο φέρετρό τους (Απεικ. 10.5). Σε πολλές περιπτώσεις τέτοιων εξετάσεων ανακαλύφθηκαν ακόμη και σωματικές ατέλειες ή και ασθένειες, που οδήγησαν το συγκεκριμένο άτομο στο θάνατο.

<sup>2</sup> <http://isnap.nd.edu/Lectures/phys10262/art-chap2-10.pdf>

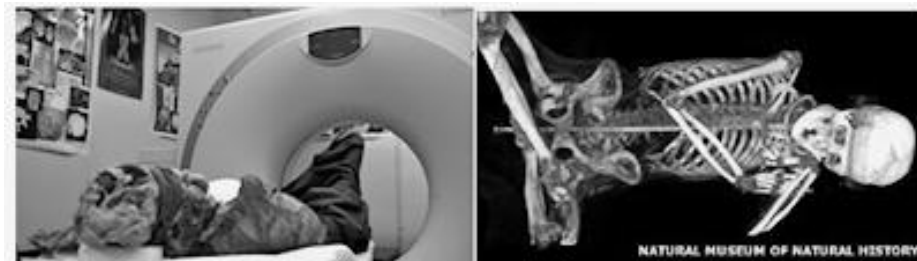


Απεικ. 10.3: (α) A. V. Dyck “Η Αγία Ροζαλία προσεύχεται για το Παλέρμο που πλήγηκε από τη χολέρα το 1624” και (β) η αυτοπροσωπογραφία του ζωγράφου, που κρυβόταν κάτω από την επιφάνειά του.



Απεικ. 10.4: Ραδιογραφική εξέταση κεραμικών: (α) Ρωγμές και ανομοιογένεια προ-ισπανικού κεραμικού, (β, γ) Μελέτη σύνδεσης των τμημάτων και επεμβάσεων σε ιαπωνικό κεραμικό (fudo-myoo)<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> [http://www.isas.illinois.edu/atam/research/conservation/conservation\\_fudomyoo.html](http://www.isas.illinois.edu/atam/research/conservation/conservation_fudomyoo.html)



Απεικ. 10.5: Τομογραφία περουβιανής μούμιας<sup>4</sup>.

Οι τεχνικές όμως, που χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια για τη διαπίστωση της αυθεντικότητας και τη συλλογή πληροφοριών για τη συντήρηση έργων τέχνης, είναι οι διαφόρων τύπων αναλύσεις με δέσμες ιόντων από επιταχυντές σωματιδίων (π.χ. PIXE, RBS, NRA, AMS)<sup>5</sup>. Η μαγνητική εστίαση της δέσμης των σωματιδίων σε περιοχές διαστάσεων της τάξεως των μερικών εκατομμυριοστών του μέτρου (σωματιδιακοί μικροαναλυτές, *particle microprobes*) επιτρέπει τη λεπτομερή και επικεντρωμένη εξέταση και μελέτη αντικειμένων τέχνης εντός ή εκτός του θαλάμου κενού του επιταχυντή (Απεικ. 10.6).

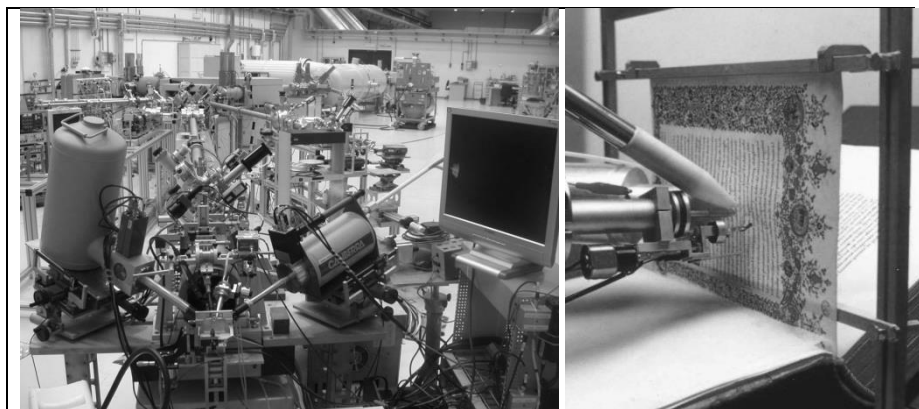
Από όλες τις τεχνικές αναλύσεων με δέσμες ιόντων, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, τις περισσότερες εφαρμογές στη μελέτη αρχαιολογικών και μουσειακών αντικειμένων βρίσκει η PIXE γιατί, πέρα από τις αποκαλύψεις απομιμήσεων, παραχαράξεων και πλαστογραφιών χειρογράφων, προηγουμένων επεμβάσεων και επικαλυμένων σχεδιασμάτων σε έργα τέχνης, η τεχνική προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες στον συντηρητή (π.χ. σύσταση χρωστικών και νομισμάτων,

<sup>4</sup> D. Nasaw and M. Danzico, BBC News Magazine, Washington, 28 October 2011, <http://www.bbc.co.uk/news/magazine-15486720>

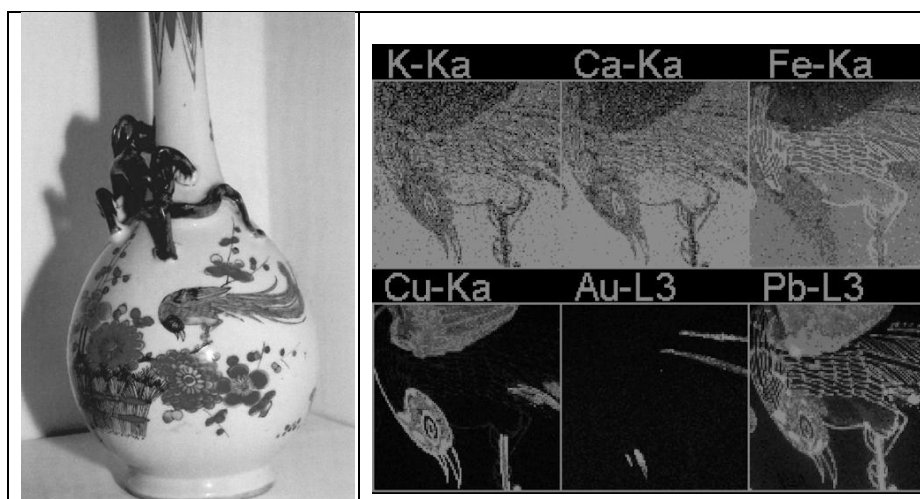
<sup>5</sup> J. Salomon et al., Present and future role of ion beam analysis in the study of cultural heritage materials: The example of the AGLAE facility, Nucl. Instr. Meth. B266(2008)2273-2278

L. Beck et al., IBA techniques: Examples of useful combinations for the characterisation of cultural heritage materials, Proc. of the 10th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, P. Misaelides and M. Kokkoris (eds), Nucl. Instr. Meth. B 269 (2011) 2999-3005.

μεταλλικών αντικειμένων και πάτινας κλπ).



Απεικ. 10.6: Ο επιταχυντής και ο σωματιδιακός μικροαναλυτής του Ινστιτούτου Πυρηνικής φυσικής της Φλωρεντίας (αριστερά)<sup>6</sup> και εξέταση χειρογράφου με τον σωματιδιακό μικροαναλυτή και εξωτερική δέσμη του επιταχυντή (δεξιά).



*Απεικ. 10.7:* Μελέτη της σύστασης των χρωστικών ενός ιαπωνικού πορσελάνινου ανθοδοχείου (αριστερά) με τη βοήθεια φθορισμού ακτίνων-Χ από ακτινοβολία συγχρότρου (δεξιά).