

Άσκηση Ραδιοχημείας

Ραδιενέργεια

Οι πυρήνες των ατόμων αποτελούνται από νουκλεόνια, δηλ. πρωτόνια και νετρόνια. Ο αριθμός Z των πρωτονίων χαρακτηρίζει τις χημικές ιδιότητες των ατόμων γιατί καθορίζει το ηλεκτρικό φορτίο του πυρήνα. Η θεωρία πυρηνικής δομής δέχεται ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των νουκλεονίων καθορίζονται από τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις, ενώ η παρατηρούμενη αστάθεια των πυρήνων καθορίζεται από τις ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις. [Τα φαινόμενα στη φύση ερμηνεύονται με την παραδοχή υπάρξεως 4 πεδίων δυνάμεων· οι άλλες δύο είναι η βαρύτητα και η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση].

Στα φυσικά ισότοπα των στοιχείων ο αριθμός των νετρονίων είναι περίπου ίσος ή λίγο μεγαλύτερος από τον αριθμό των πρωτονίων στον πυρήνα. Πυρήνες που έχουν διαφορετική αναλογία νουκλεονίων τείνουν να υποστούν μετατροπή που οδηγεί σε σταθερότερο συνδυασμό. Η διαδικασία αποτελεί μεταστοιχείωση επειδή αλλάζει ο ατομικός αριθμός του πυρήνα και συνοδεύεται από εκπομπή μάζας και συχνά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτή η εκπομπή ονομάζεται ραδιενέργεια. Οι συνήθεις μορφές της είναι πυρήνες ηλίου (2 πρωτόνια και 2 νετρόνια, ${}^4\text{He}^{2+}$) που ονομάζονται σωματίδια άλφα («ακτίνες α»), ηλεκτρόνια («ακτινοβολία β», e^-) και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ακτίνες γ) μεγάλης ενέργειας (μεγαλύτερης από τις ακτίνες χ). Η εκπομπή σωματιδίων άλφα μειώνει τον ατομικό αριθμό του πυρήνα κατά 2 και τον μαζικό αριθμό του (A) κατά 4. Η εκπομπή σωματιδίων βήτα προκύπτει από διάσπαση ενός νετρονίου σε πρωτόνιο και ηλεκτρόνιο, άρα προκαλείται αύξηση του ατομικού αριθμού κατά 1 και διατήρηση του μαζικού αριθμού. Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας παρατηρείται όταν ο θυγατρικός πυρήνας σχηματίζεται με εσωτερική διέγερση και το πλεόνασμα ενεργείας αποβάλλεται ως φωτόνιο.

Το απλούστερο ραδιενεργό ισότοπο είναι το τρίτιο (${}^3\text{H}$) (χρησιμοποιείται σε πυρηνικές βόμβες και σύντηξη), ενώ από τα γνωστότερα είναι ${}^{14}\text{C}$ (ραδιοχρονολόγηση), ${}^{40}\text{K}$ (το αφθονότερο ραδιενεργό του ανθρώπου), ${}^{60}\text{Co}$, ${}^{90}\text{Sr}$ (θεραπευτικές χρήσεις ακτινοβολίας), ${}^{236}\text{Ra}$ (ιστορικής σημασίας, αυτόφωτες ενδείξεις), ${}^{235}\text{U}$ (πυρηνικά εργοστάσια, όπλα), ${}^{242}\text{Pu}$ (τα ίδια). Όλα τα στοιχεία έχουν ραδιενεργά ισότοπα, αλλά κανένα στοιχείο με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του Pb (82) δεν είναι σταθερό. Το Tc και το Pm είναι τα μόνα στοιχεία με ατομικό αριθμό μικρότερο από 82 τα οποία δεν έχουν κανένα σταθερό ισότοπο.

Μια ραδιενεργός διάσπαση παράγει ένα νέο πυρήνα ο οποίος μπορεί να είναι σταθερός ή επίσης ραδιενεργός. Στη δεύτερη περίπτωση αναφερόμαστε σε αλυσίδα ραδιενεργών διασπάσεων η οποία τερματίζεται, αργά ή γρήγορα, σε σταθερό πυρήνα.

Ο ρυθμός ραδιενεργού διασπάσεως εξαρτάται από την δομή του κάθε πυρήνα. Είναι φαινόμενο που ακολουθεί κινητική πρώτης τάξεως, δηλαδή ο ρυθμός των διασπάσεων (ένταση της ραδιενέργειας) είναι ανάλογος της ποσότητας του ραδιενεργού στοιχείου:

$$\frac{dN}{dt} = -kN \quad (8-1)$$

Αν έχουμε ποσότητα N_0 ραδιενεργού υλικού σε χρόνο $t = 0$,

$$N(t) = N_0 e^{-kt} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}, \quad (8-2)$$

όπου $t_{1/2}$ είναι ο χρόνος υποδιπλασιασμού που απαιτείται για την μείωση της αρχικής εντάσεως της ραδιενέργειας στο ήμισυ. Οι τιμές του $t_{1/2}$ κυμαίνονται από 10^{-6} s μέχρι 10^{19} έτη και αποτελούν το μέσο για την χρονολόγηση αντικειμένων όπως αρχαιολογικά ευρήματα λίγων χιλιάδων ετών και μετεωρίτες και πλανήτες ηλικίας δισεκατομμυρίων ετών.

Η παρατήρηση της ραδιενέργειας γίνεται χάρη στην μεγάλη ενέργεια όλων των μορφών της. Όλες οι μορφές μπορούν να προκαλέσουν ιοντισμό μορίων και εμείς μπορούμε να καταγράψουμε το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται. Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να προκληθούν ποικίλες αντιδράσεις σε περίπλοκα χημικά συστήματα όπως οι βιολογικοί ιστοί με συνέπειες όπως μεταλλάξεις και καρκίνο.

Η διεισδυτική ικανότητα της ραδιενέργειας εξαρτάται από την μορφή της, την ενέργειά της και την έντασή της. Τα σωματίδια α συνήθως απορροφώνται από λεπτά στρώματα της ύλης, ακόμη και αέρα πάχους λίγων εκατοστών. Τα σωματίδια β εισχωρούν μέσα σε όλα τα υλικά, αλλά για συνήθη δείγματα αποκόπτονται από συμπαγή ύλη από στρώματα πάχους μερικών εκατοστών. Οι ακτίνες γ είναι οι πιο διειδυτικές και απαιτούν την ισχυρότερη προστασία την οποία επιτυγχάνουμε με φύλλα μολύβδου πάχους αρκετών cm.

Μετρήσεις: 1. Οργανολογία – χαρακτηριστικά του ανιχνευτή

Η ανίχνευση της ραδιενέργειας γίνεται κυρίως με ανιχνευτές Geiger-Müller. Πρόκειται για ένα σωλήνα που περιέχει αέριο σε χαμηλή πίεση και διαθέτει δύο ηλεκτρόδια μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται υψηλή τάση (μερικές εκατοντάδες V). Κάθε διέλευση ραδιενεργού ακτινοβολίας από το αέριο δημιουργεί ιόντα και απελευθερώνει ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται προς το ένα ηλεκτρόδιο και παρατηρούνται ως στιγμιαίο ρεύμα με κατάλληλο ενισχυτή. Κάθε διακύμανση του ρεύματος καταμετρείται ως μια «κρούση» και σε ορισμένες διατάξεις παράγει ανάλογο ακουστικό σήμα. Ο ρυθμός κρούσεων μετρείται συνήθως σε κρούσεις ανά λεπτό (cpm).

Η απόδοση του μετρητή εξαρτάται από την τάση λειτουργίας του. Σε πολύ χαμηλές τιμές δεν καταγράφονται κρούσεις, ενώ σε πολύ υψηλές σχηματίζεται πλάσμα μέσα στον ανιχνευτή και παρατηρούνται τεράστιες τιμές. Με σταδιακή αύξηση της τάσης μπορεί να βρεθεί η πιο κατάλληλη στην οποία παρατηρείται η μικρότερη μεταβολή των μετρήσεων για ορισμένη αύξηση της τάσης.

Η ραδιενέργεια που ανιχνεύουμε στο πείραμα προέρχεται κυρίως από τα δείγματα τα οποία πλησιάζουμε στον ανιχνευτή. Όμως η ύλη γύρω μας, που περιέχει ραδιενεργά ισότοπα

σε μικρές ποσότητες, και η κοσμική ακτινοβολία, η οποία βομβαρδίζει τη γη, προκαλούν καταμέτρηση κρούσεων από τον μετρητή. Αυτές οι πηγές σήματος συνεισφέρουν στην τιμή υποβάθρου I_0 η οποία πρέπει να αφαιρείται από όλες τις μετρήσεις.

Η υψηλή τάση που εφαρμόζεται στον ανιχνευτή δεν επανέρχεται αμέσως στην αρχική της τιμή μόλις σχηματισθούν τα ιόντα μέσα στο αέριο και ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι να επανέλθει σε επιπέδο που επιτρέπει την καταγραφή του επόμενου σωματιδίου ονομάζεται χρόνος νεκρώσεως (τ). Ο χρόνος νεκρώσεως προκαλεί αρνητικό σφάλμα στις μετρήσεις και είναι απαραίτητο να προσδιορίζεται ώστε να μπορεί να γίνει η κατάλληλη διόρθωση. Αν I είναι ο πραγματικός ρυθμός κρούσεων και I' η αντίστοιχη μέτρηση, ισχύει $I' = I(1 - \tau I')$. (8-3)

Μπορούμε να προσδιορίσουμε τον τ μετρώντας δυο ραδιενεργά δείγματα χωριστά (I_1 , I_2) και μαζί (I_{12}). Κανονικά (δηλ. με $\tau = 0$) θα ίσχυε: $I_1 + I_2 + I_0 = I_{12} + I_0$. (8-4)

Αν $\tau I' \ll 1$, τότε:

$$(I_{12}' + I_0') [1 + \tau(I_{12}' + I_0')] = (I_1' + I_0') [1 + \tau(I_1' + I_0')] + (I_2' + I_0') [1 + \tau(I_2' + I_0')], \quad (8-5)$$

$$\text{οπότε προσεγγιστικά } \tau = \frac{I_1' + I_2' - I_{12}' - I_0'}{2I_1' I_2'} \quad (8-6)$$

Γνωρίζοντας τον αρχικό ρυθμό διασπάσεων ενός δείγματος όταν συσκευάστηκε και τον χρόνο ημιζωής του ραδιενεργού περιεχομένου του μπορούμε να προσδιορίζουμε την ευαισθησία του ανιχνευτή μας για την επιλεγμένη απόσταση του δείγματος και την τάση λειτουργίας.

2. Στατιστική μετρήσεων

Η ραδιενεργές διασπάσεις είναι ανεξάρτητα τυχαία φαινόμενα τα οποία υπόκεινται σε απαρίθμηση. Γι' αυτό ακολουθούν κατανομή Poisson χαρακτηριστικό της οποίας είναι η σχέση μεταξύ μέσης τιμής και τυπικής αποκλίσεως: $\sigma = \sqrt{\bar{x}}$ (8-7)

όπου οι ποσότητες υπολογίζονται ως συνήθως από τις σχέσεις:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i x_i}{N} \quad (8-8) \quad \text{και} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (8-9)$$

3. Απορρόφηση ραδιενέργειας

Η ενέργεια των φορέων της ραδιενέργειας είναι της τάξεως μεγέθους του 1 MeV ($= 1.6 \times 10^{-13}$ J). Το βάθος στο οποίο μπορούν να εισχωρήσουν στην ύλη εξαρτάται από την φύση τους (αν είναι α , β ή γ), την ενέργειά τους και την φύση του απορροφητή με κυριότερη ιδιότητα την επιφανειακή πυκνότητά του ($=$ μάζα/επιφάνεια). Τα σωματίδια α αλληλεπιδρούν έντονα με την ύλη και αποκόπτονται σε πολύ μικρό βάθος, ενώ τα β εισχωρούν πολύ περισσότερο.

Παρεμβάλλοντας φύλλα με διάφορες τιμές επιφανειακής πυκνότητας d παρακολουθούμε την ελάττωση της διερχόμενης ραδιενέργειας. Για την ακτινοβολία β από

γραφική παράσταση της $\log(I) = f(d)$ προσδιορίζουμε την εμβέλεια R της ακτινοβολίας η οποία είναι η χαμηλότερη τιμή d για την οποία $\log(I) = f(d=\infty)$, δηλ. για $d > R$ η καμπύλη είναι περίπου οριζόντια.

Χρησιμοποιώντας την εμπειρική σχέση του Gledenin μπορούμε να βρούμε την μέγιστη ενέργεια της ακτινοβολίας β με βάση την εμβέλειά της.

$$R = 407 \text{ mg/cm}^2 \cdot (E_{\max}/\text{MeV})^{1.38}, \quad \text{αν } 0.15 \text{ MeV} < E_{\max} < 0.8 \text{ MeV} \quad (8-10)$$

$$R = 542 \text{ mg/cm}^2 \cdot E_{\max}/\text{MeV} - 133 \text{ mg/cm}^2, \quad \text{αν } 0.8 \text{ MeV} < E_{\max} < 3 \text{ MeV} \quad (8-11)$$

Με αντικατάσταση της τιμής $E_{\max} = 0.8 \text{ MeV}$ προκύπτει ότι η (8-10) ισχύει για $R < 300 \text{ mg/cm}^2$ και η (8-11) για $R > 300 \text{ mg/cm}^2$.

Οδηγίες εκτέλεσης και επεξεργασίας μετρήσεων

Λαμβάνονται μετρήσεις διάρκειας 30 s με μια ραδιενεργό πηγή σε σταθερή απόσταση από τον ανιχνευτή μεταβάλλοντας την τάση λειτουργίας του. Με τη βοήθεια διαγράμματος των μετρήσεων αυτών επιλέγεται η σταθερότερη περιοχή τάσης λειτουργίας του ανιχνευτή και αυτή χρησιμοποιείται κατά τις επόμενες μετρήσεις.

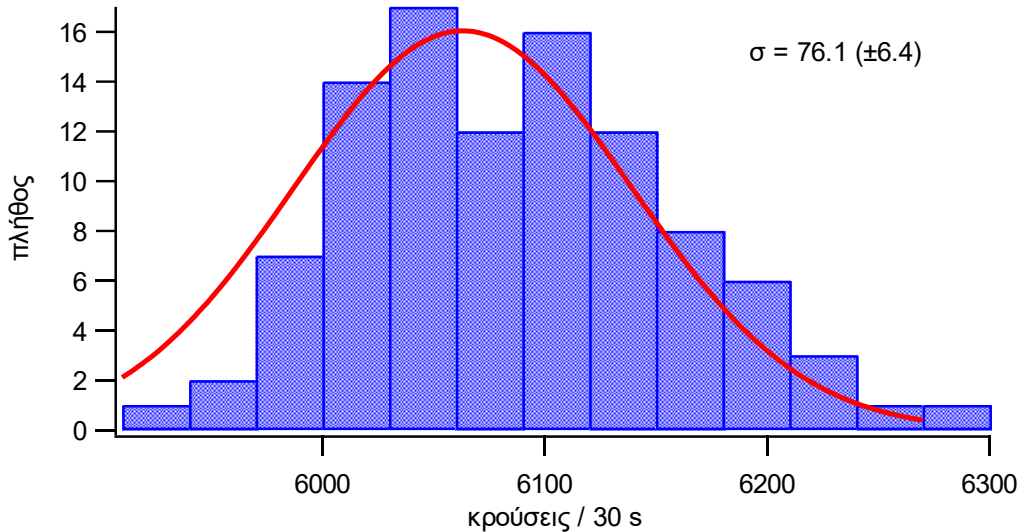
Καταγράφεται μέτρηση διάρκειας 300 s χωρίς ραδιενεργό πηγή για τον προσδιορισμό του υποβάθρου. Αυτή η τιμή ανάγεται στην εκάστοτε διάρκεια μιας μετρήσεως και αφαιρείται από αυτήν. Σε όλες τις μετρήσεις δειγμάτων, αλλά ιδιαίτερος στην περίπτωση της μετρήσεως του υποβάθρου τα ραδιενεργά δείγματα διατηρούνται σε απόσταση μεγαλύτερη από 60 cm από τον ανιχνευτή.

Καταγράφονται οι μετρήσεις I_1' , I_2' και I_{12}' διάρκειας 300 s χρησιμοποιώντας πρώτα ανά μία και τέλος μαζί δύο πηγές ημικυκλικού σχήματος. Υπολογίζεται ο χρόνος νεκρώσεως τ του ανιχνευτή από την σχέση (8-6). Ελέγχεται επιτόπου το πρόσημο του τ και, αν βγει αρνητικό, επαναλαμβάνεται σχολαστικά η σειρά των 4 εμπλεκόμενων μετρήσεων. Η μονάδα μετρήσεως του τ προκύπτει από τις μονάδες των I (ρυθμών κρούσεων) που εισάγονται στην σχέση (8-6).

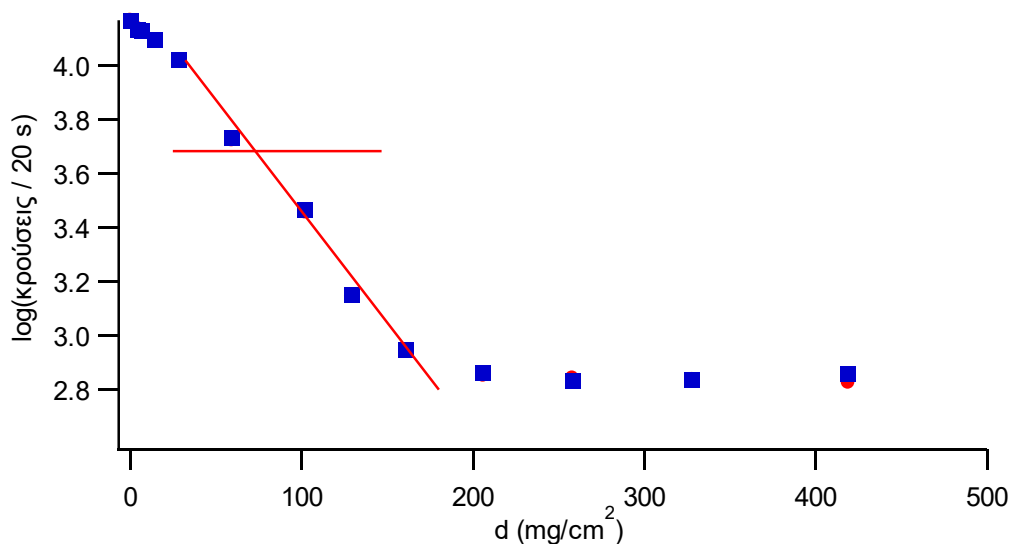
Λαμβάνεται σειρά 60 μετρήσεων διάρκειας 20 s με μια ραδιενεργό πηγή σε σταθερή θέση για την επαλήθευση της κατανομής Poisson. Υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση από τις σχέσεις (8-8) και (8-9) και ελέγχεται η (8-7). Κατασκευάζεται ραβδόγραμμα της κατανομής των τιμών των μετρήσεων (όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα), όπου γίνεται ομαδοποίηση των τιμών ώστε να προκύπτουν 10-15 ράβδοι. Η κατανομή προσεγγίζεται

υπολογιστικά με συνάρτηση Gauss $y = A \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2\right)$ και υπολογίζεται η τυπική

απόκλιση σ της κατανομής.



Λαμβάνεται σειρά μετρήσεων διάρκειας 30 s με μια ραδιενεργό πηγή σε σταθερή απόσταση από τον ανιχνευτή παρεμβάλλοντας 20 φύλλα απορροφητή (αργιλίου, πολυμερούς, και μολύβδου) γνωστής επιφανειακής πυκνότητας. Από το κατάλληλο διάγραμμα (το οποίο αναφέρεται παραπάνω και φαίνεται αμέσως παρακάτω) προσδιορίζονται η φύση, εμβέλεια και από αυτήν η μέγιστη ενέργεια της ακτινοβολίας β της πηγής με χρήση της κατάλληλης σχέσεως από τις (8-10) και (8-11). Συγκρίνεται η τιμή της E_{max} με την βιβλιογραφία για το ραδιενεργό υλικό το οποίο μελετήθηκε.



Λαμβάνοντας υπόψη την ηλικία του ραδιενεργού δείγματος, την αρχική του ακτινοβολία και τον χρόνο ημιζωής όπως αναγράφονται πάνω στο δείγμα, την σχέση (8-2) και την μέση τιμή των 60 μετρήσεων υπολογίζεται η απόδοση του ανιχνευτή (= μετρούμενες κρούσεις / αναμενόμενες κρούσεις). Η ένταση της ακτινοβολίας σημειώνεται στα συγκεκριμένα δείγματα σε curies, όπου $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ διασπάσεις/s.