Πυρηνική Φυσική (Φροντιστήριο)

Ευσταθία Πέτρου

Υποψήφια Διδάκτορας – Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής

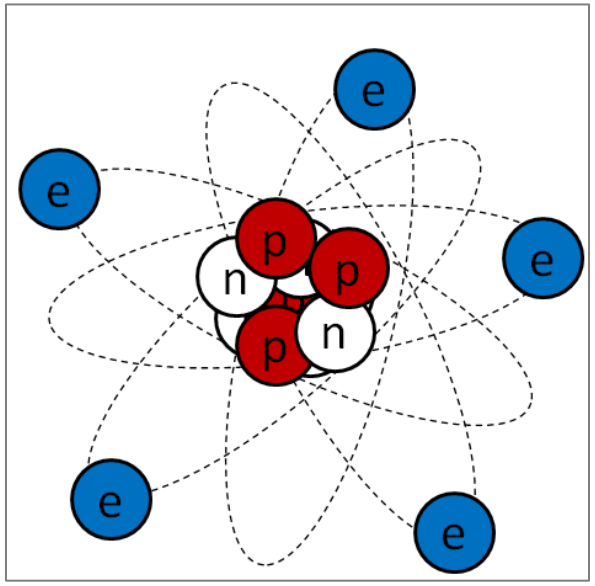
Τμήμα Ιατρικής – Πανεπιστήμιο Πατρών

Περιεχόμενα

- Εισαγωγή και Στόχοι Φροντιστηρίου
- Δομή Πυρήνα & Ενέργεια Σύνδεσης
- Είδη Ραδιενεργού Διάσπασης
- Νόμος Διάσπασης & Χρόνοι Ημιζωής
- Ραδιενεργός Ισορροπία & Γεννήτρια Τεχνητίου (Tc-99m)
- Υπολογιστικές Ασκήσεις & Εφαρμογές

Δομή Πυρήνα & Ενέργεια Σύνδεσης

- Ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια, τα οποία βρίσκονται περιορισμένα σε μια περιοχή του ατόμου
- Ο πυρήνας ενός στοιχείου X με ατομικό αριθμό Z και μαζικό αριθμό A καλείται νουκλίδιο και συμβολίζεται ως ${}^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}$
- Τα νουκλίδια διακρίνονται σε:
  - **Ισότοπα** - Ίδιο Z, διαφορετικό A και N (ίδιο στοιχείο)
  - **Ισότονα** - Ίδιο N (διαφορετικά στοιχεία)
  - **Ισοβαρή** - Ίδιο A και διαφορετικό Z, N (διαφορετικά στοιχεία)

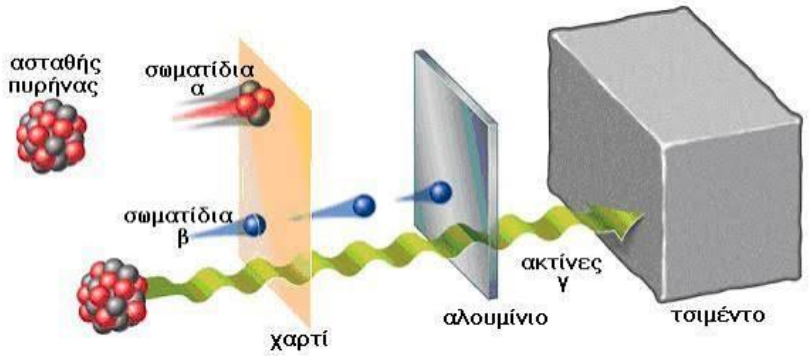


- Έλλειμα μάζας: $\Delta m = \left(Z \cdot m_p + N \cdot m_n\right) - m_{\text{πυρήνα}} > 0$
- Ενέργεια Σύνδεσης: $E_B = \Delta m \cdot c^2$
- <u>Κριτήριο Σταθερότητας (E_B/A)</u>:
  - Όσο μεγαλύτερος ο λόγος E_B/A, τόσο πιο σταθερός ο πυρήνας
  - Απόκλιση από τη «ζώνη σταθερότητας» $N/Z \Longrightarrow$ Ραδιενεργός Διάσπαση

	Πρωτόνια	Νετρόνια	Ηλεκτρόνια
Αριθμός	Z	N	Z
Φορτίο	+e	0	-e
Μάζα	1.00728u	1.00866u	$\sim 10^{-4}$ u

Είδη Ραδιενεργού Διάσπασης

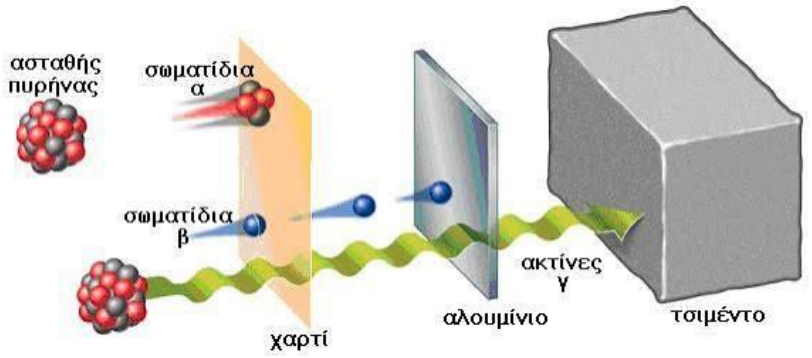
- **Διάσπαση α**
  - Εξίσωση: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + Q_{\alpha}$
  - Εκπομπή πυρήνα Ηλίου (${}^{4}_{2}\mathrm{He}$), υψηλός ιοντισμός, εμβέλεια $\sim \mu\mathrm{m}$ σε ιστό $\longrightarrow$ μικρή διεισδυτικότητα
  - Εφαρμογή: Στοχευμένη Αλφα-Θεραπεία



- **Διάσπαση Βήτα Πλην (β^{-})**
  - ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + e^{-} + \bar{\nu}_{e} + Q_{\beta^{-}} \quad (n \rightarrow p^{+} + e^{-} + \bar{\nu}_{e})$
  - Το ενεργειακό φάσμα είναι συνεχές, η ενέργεια μοιράζεται τυχαία και στα δύο σωματίδια
  - Εφαρμογή: Θεραπεία (π.χ. ${}^{131}\mathrm{I}$, ${}^{90}\mathrm{Y}$)

Είδη Ραδιενεργού Διάσπασης

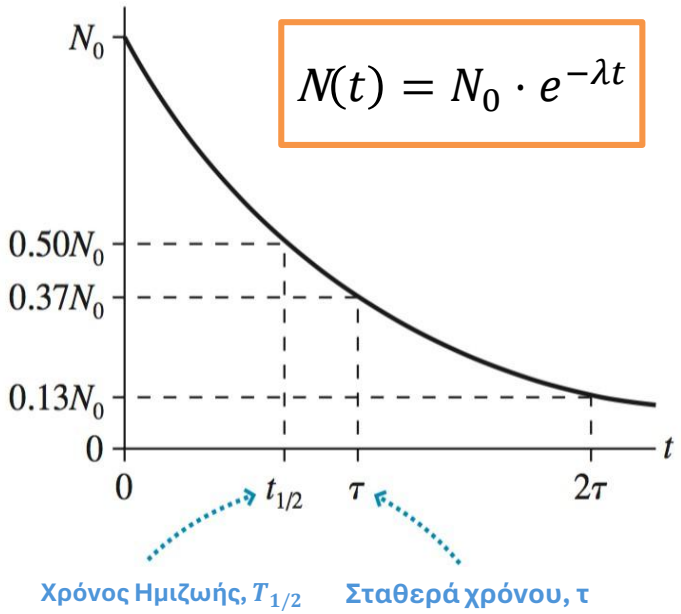
- **Διάσπαση Βήτα Συν (β^+) & Εξαΰλωση**
  - Εξίσωση: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + e^+ + \nu_e + Q_{\beta^+} \quad (p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e)$
  - Κατώφλι Ενέργειας: $m(\mathrm{X}) - m(\mathrm{Y}) \geq 2m_e \approx 1.022$ MeV
  - Φαινόμενο Εξαΰλωσης: $e^+ + e^- \longrightarrow 2 \times 511$ keV (αντιδιαμετρικά φωτόνια γ σε $180°$)
  - Εφαρμογή: Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων (PET, π.χ. ${}^{18}\mathrm{F}$–FDG)
- **Διάσπαση γ**
  - Εξίσωση: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}^* \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + \gamma \quad \left(E_\gamma = h\nu = E_i - E_f\right)$
  - Μεγάλη διεισδυτικότητα
  - Εφαρμογές: Διαγνωστική απεικόνιση SPECT / Γ-Κάμερα (π.χ. ${}^{99\mathrm{m}}\mathrm{Tc}$)



Νόμος Διάσπασης & Χρόνοι Ημιζωής

- Ενεργότητα (A): Πόσες διασπάσεις γίνονται στη μονάδα του χρόνου
- Μονάδες: $\mathbf{1\ Bq = 1\ dey/sec}$, $\mathbf{1\ Ci = 3.7 \times 10^{10}\ Bq}$

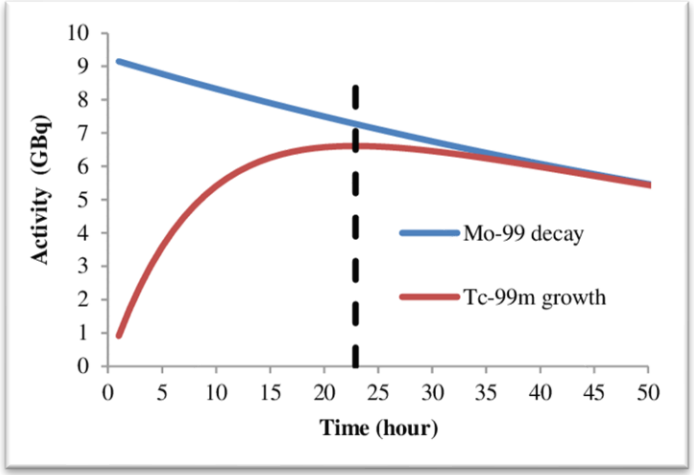
  MBq(10^6 Bq) ή mCi(1 mCi = 37 MBq)
- Εκθετικός Νόμος Διάσπασης: $\mathbf{A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}}$
- Σταθερά Διάσπασης (λ): $\boldsymbol{\lambda = \frac{ln(2)}{T_{1/2}} \approx \frac{0.693}{T_{1/2}}}$
- Χρόνος Ημιζωής ($T_{1/2}$): Ο χρόνος που απαιτείται για να <u>υποδιπλασιαστεί</u> η ενεργότητα
- Σταθερά Χρόνου (τ): η μέση διάρκεια ζωής ενός πυρήνα μέχρι να διασπαστεί
- Πρακτικός Κανόνας Υποδιπλασιασμών: $\mathbf{A(t) = \frac{A_0}{2^n}}$, **όπου** $\mathbf{n = \frac{t}{T_{1/2}}}$

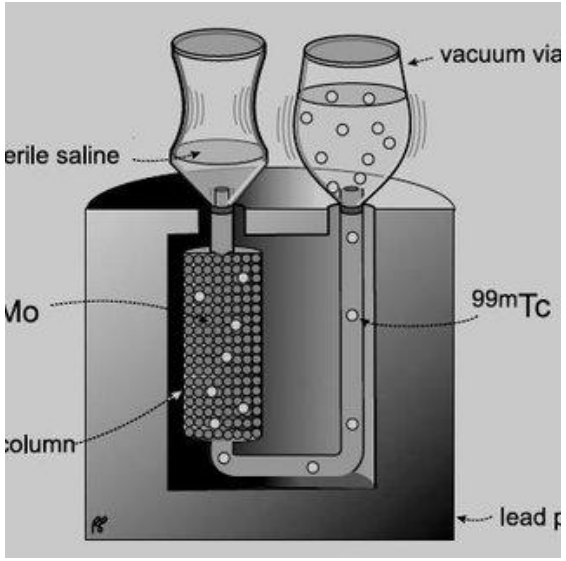


Ραδιενεργός Ισορροπία & Γεννήτρια Τεχνητίου (Tc-99m)

- <u>Η Γεννήτρια ^{99}Mo/^{99m}Tc:</u>
  - Μητρικό Στοιχείο: ^{99}Mo ($T_{1/2} = 66$ h) – Αργή διάσπαση
  - Θυγατρικό Στοιχείο: ^{99m}Tc ($T_{1/2} = 6$ h) – Γρήγορη διάσπαση

- <u>Μεταβατική Ισορροπία (Transient Equilibrium):</u>
  - Επειδή $T_{1/2,\text{μητέρας}} \gg T_{1/2,\text{θυγατέρας}}$, η ενεργότητα της θυγατέρας ακολουθεί αυτή της μητέρας
  - **Μέγιστη συγκέντρωση:** Κάθε 24 ώρες (έτοιμο για την πρωινή βάρδια του νοσοκομείου)





Υπολογιστικές Ασκήσεις & Εφαρμογές

- Ένας ασθενής πρόκειται να κάνει σπινθηρογράφημα θυρεοειδούς. Στις 08:00 το πρωί παρασκευάζεται σύριγγα με ^{99m}Tc (χρόνος ημιζωής $T_{1/2} = 6$ ώρες) που έχει ενεργότητα 400 MBq. Η εξέταση καθυστερεί και τελικά η ένεση γίνεται στις 20:00 το βράδυ.

Ερώτημα: Ποια είναι η ενεργότητα της σύριγγας την ώρα της ένεσης;

- Το εργαστήριο έχουμε ένα φιαλίδιο με ^{18}F–FDG ($T_{1/2} = 110$ λεπτά) το οποίο στις 10:00 το πρωί έχει συγκέντρωση ενεργότητας 200 MBq/mL. Θέλουμε να χορηγήσουμε σε έναν ασθενή για PET scan δόση 300 MBq ακριβώς στις 10:00.

Ερωτήματα:

a. Πόσο όγκο (mL) πρέπει να αναρροφήσουμε στη σύριγγα στις 10:00;

b. Αν ο ασθενής αργήσει και του κάνουμε την ένεση στις 13:40 (220 λεπτά μετά), πόσος όγκος από το ίδιο φιαλίδιο θα χρειαστεί τότε για την ίδια δόση των 300 MBq;

Υπολογιστικές Ασκήσεις & Εφαρμογές

- Μετά από μια θεραπεία θυρεοειδούς με ^{131}I ($T_{1/2} = 8$ ημέρες), έμεινε στο εργαστήριο ένα μολυσμένο φιαλίδιο με αρχική ενεργότητα 800 MBq. Η νομοθεσία ορίζει ότι το υλικό μπορεί να απορριφθεί ως κοινό απόβλητο όταν η ενεργότητά του πέσει κάτω από τα 25 MBq.

Ερώτημα: Πόσες ημέρες πρέπει να μείνει το φιαλίδιο στην αποθήκη ραδιενεργών αποβλήτων πριν απορριφθεί;

Άσκηση BONUS

Στις 08:00 το πρωί παραλαμβάνουμε φιαλίδιο ^{99m}Tc ($T_{1/2} = 6$ ώρες) όγκου 10 mL με συνολική ενεργότητα 1600 MBq. Ο γιατρός ζητά να ετοιμάσουμε μια δόση 200 MBq για έναν ασθενή που θα εξεταστεί στις 14:00 το μεσημέρι.

Ερώτημα: Πόσα mL πρέπει να αναρροφήσει ο παρασκευαστής στη σύριγγα στις 14:00;