

8. דוזימטריה של נויטרונים

השפעה של נויטרונים על הגוף

קיימת חלוקה חזקה בין הנזק שנגרם לגוף לבין אנרגיית הנויטרונים.

אינטראקציה של נויטרונים:

אנרגיה נמסרת בפיזור אלסטי:

$$\varepsilon_{el}(\theta, E) = \frac{2AE}{(A+1)^2} (1 - \cos \theta_{cm})$$

אינאלסטי:

$$\varepsilon_d(\theta, E) = \frac{2AE}{(A+1)} - \frac{\bar{E}'}{(A+1)} - \frac{2AE}{(A+1)^2} \cos \theta_{cm} \left[1 - \frac{(A+1)\bar{E}'}{AE} \right]$$

\bar{E}' - אנרגיית הרתיעה שנמסרת לאטום שממנו נפלט נויטרון.

גוף האדם מורכב בעיקר מהיסודות H N C O

יש לחשב קרמה לכל יסוד:

$$K(E) = \sum_i N_i \left[\sum_j \varepsilon_{ij}(E) \sigma_{ij}(E) \right]$$

N_i - מס' גרעינים לגרם

σ_{ij} - חתך פעולה לריאקציה מסוג j על גרעין מסוג i

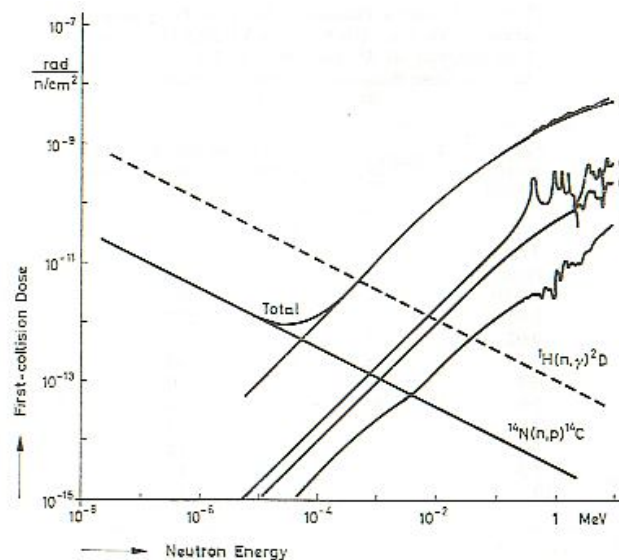


FIG. 26. The calculated first-collision dose curve for standard tissue, referred to 1 n/cm², as a function of neutron energy. The energy is transferred to recoil nuclei of hydrogen, oxygen, carbon, and nitrogen by elastic scattering and also by the ¹⁴N(n, p)¹⁴C reaction with nitrogen [126]. The energy transfer by the ¹H(n, γ)²D reaction is not considered in the first-collision dose.

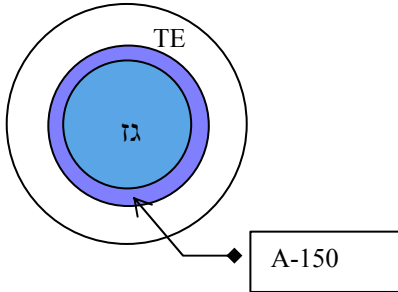
- המינימום נמצא בסביבות 1 keV (הכי פחות מזיק).
- רק במקרה של חנקן N יש עליה הדוזה עם ירידת האנרגיה.

גלאי T.E - חישוב הדוזה

הגלאי יכול להיות גז TE או פלסטיק

$$D_g = \frac{Q \omega_g}{m e} \quad \text{: הדוזה בגלאי}$$

Q – מטען נוצר; m – מסת הגז; e-מטען אלקטרון; ω - אנרגיה ליצירת זוג יונים בגז.



הדופן עשויה מפלסטיק A-150 וכושר עצירה שונה מהגז.

$$r = S_{gas}^{wall}$$

$$D'_{wall} = D_{gas} r \quad \text{: הדוזה שנבלעת בקירות}$$

$$D_{TE} = D_{wall} \frac{(\mu_{en} / \rho)_{tissue}}{(\mu_{en} / \rho)_{wall}}$$

תיקון קריאת המטען:

$$Q = R \Pi k_R$$

R – הקריאה.

Πk_R - מכיל גורם כיוול אבסולוטי, תיקון טמפרטורה, תיקון לחץ, זרם זליגה הפסדי יינון

מרקומבינציה, גורמי קיטוב, וכן הפסדים בגלל איסוף לא מלא של גז.

$$(D_i) = \left[R \Pi k_R \frac{1}{m} \right] \frac{(\omega_g)}{e} r d \frac{(\mu / \rho)_t}{(\mu / \rho)}$$

מסת הגז m מתקבלת מכיוול חשיפה של התא.

גורם החשיפה:

$$N_c = \frac{x_c}{Q_c}$$

x_c - חשיפה באוויר.

הקרמה באוויר לאחר כיוול:

$$(K_a)_c = X_c \left[\frac{\omega_a}{e} \right] [1 - (g_a)_c]^{-1}$$

g- החלק מהקרמה שמועבר לאוויר ע"י תהליך בלימה (bremsstrahlung).

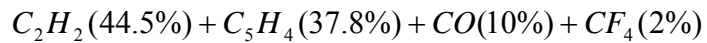
$$(K_{wall})_c = (K_a)_c \left[\frac{(\mu/\rho)_{wall}}{(\mu/\rho)_{air}} \right]_c$$

הקרמה בקיר לפי יצירת אלקטרונים במרכז התא:

$$(K'_{wall})_c = (K_{wall})_c (\Pi k_A)_c$$

הערך מכיל כבר את כל גורמי התיקון הנחוצים.

הגז A-150 מתקבל מתערובת:



בגז TE :

$$\left(\frac{\omega}{e} \right)_n = 3.14 \text{ ev}$$

$$\left(\frac{\omega}{e} \right)_{Co^{60}} = 29.2 \text{ ev}$$

אם ממלאים בגז A-150 אז הקיר והגז במעט זהים:

$$S_{gas}^{wall} = 0.995$$

$$. S_{gas}^{wall} = \frac{1.177}{1.14} \text{ לעומת}$$

לפי הפרוטוקול האמריקני (AAPM):

הדוזה הכוללת ברקמה:

$$D_{i,T} = N_c A_{wc} f_{ic} d_{NG} k_T^{-1} Q_T$$

N_c - גורם תיקון ידוע לטמפרטורה ולחץ נתונים

A_{wc} - גורם תירון הנחתה

f_{ic} - יחס בין חשיפה לדוזה

d_{NG} - תיקון לקרינת גמה

כאשר

$$k_T^{-1} = \frac{(S_{wg})_N \bar{W}_N K_N}{(S_{wg})_c W_c K_c}$$

K_N - קרמה של נויטרונים ברקמה

K_c - קרמה לפי כיוול.

לפי הפרוטוקול האירופי (ECNECU):

הדוזה הכוללת היא סכום הדוזה מנויטרונים ומקרינת גמה:

$$D_N + D_G = N_C (\Pi K_A)_C f_{t,c} d_T k_T^{-1} \frac{1}{1 + \delta} R_T (\Pi k_R)_T$$

d_T - תיקון המקום.

δ - מקדם תיקון כתוצאה ממרכבי גזים בגלאי.

$$k_T^{-1} = \frac{\Gamma_n \bar{W}_N}{(S_{wg})_c W_c} \left[\frac{(K_t / K_w)_N}{(\mu / \rho)_t / (\mu / \rho)_w} \right]_c$$

Γ_n - יחס בליעות בין גז לדופן

$(K_t / K_w)_N$ - יחס קרמה בין רקמה לקיר.

צורת הגלאים

$R = 1 \text{ cm}$

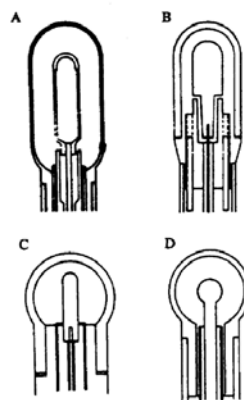


FIGURE 439. Design sketches of four tissue-equivalent ionization chambers manufactured by: (A) Centre d'Etude Nucléaires, Fontenay-aux-Roses, France (CENF). (B) Exradin, Warrenville, Illinois, USA. (C) Far West Technology, Goleta, California, USA (FWT, EG&G). (D) Radiobiological Institute TNO, Rijswijk, The Netherlands (TNO). (From Zoetelieb, J. and Broerse, J. J., *Phys. Med. Biol.*, 28, 503, 1983. With permission.)

יש גם גלאים מאורכים.

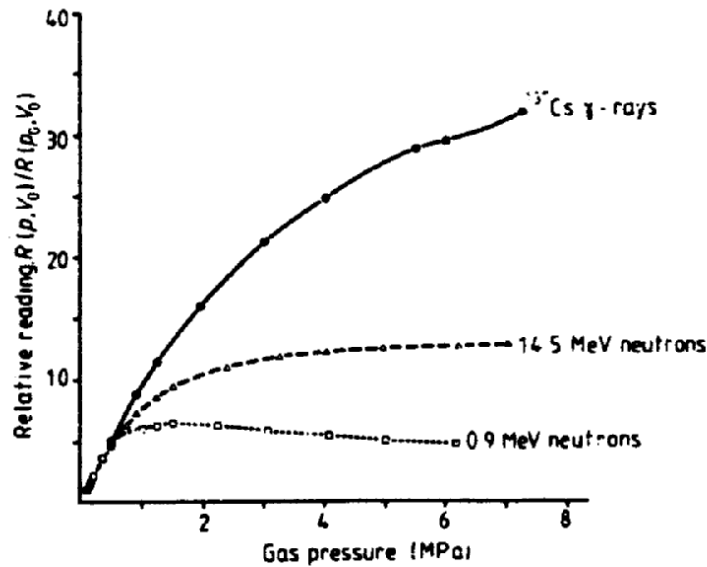


FIGURE 441. Pressure dependence of the reading relative to that at 1 bar (0.1 MPa) at a collecting potential of 600 V for various types of radiation measured with the methane-based TE gas ionization chamber. (From Zoetelieb, J. and Broerse, J. J., *Phys. Med. Biol.*, 28, 503, 1983. With permission.)

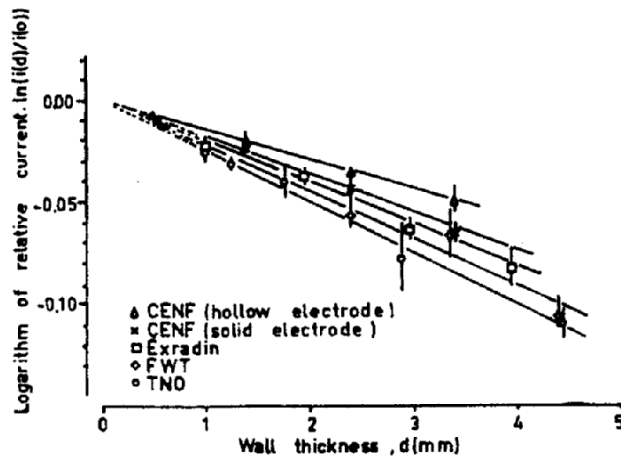


FIGURE 443. Effects of wall thickness (d) on the ionization chamber reading for four chambers irradiated with 0.6 MeV neutrons. The effects of the use of a massive or hollow central electrode are shown for the CENF chamber. (From Zoetelieb, J. and Broerse, J. J., *Phys. Med. Biol.*, 28, 503, 1983. With permission.)

השטפים

$$\phi(E) = \left[\frac{n}{cm^2} / Mev \right] \text{ אם נתון}$$

בהנחה שיש ש"מ מטענים:

$$D_{A-150} = \int_0^{E \max} \phi(E) F_{A-150}(E) dE$$

$$F_{A-150} - \text{פקטור כיוול הרקמה ביחידות } rad \frac{cm^2}{n}$$

$$\frac{D_{tissue}}{D_{A-150}} = \frac{\int_0^{E \max} \phi(E) F_{tissue}(E) dE}{\int_0^{E \max} \phi(E) F_{A-150}(E) dE}$$

$$\frac{D_{tissue}}{D_{A150}} = \frac{k_{tissue}}{k_{A150}} = \frac{F_{tissue}}{F_{A150}} \quad \text{במקרה מונו-אנרגטי:}$$

$$\frac{D_{TE}}{K_{A150}} = \frac{(Q/m)_{TE} \left(\frac{\omega}{e}\right)_{TE}}{K_{A150}} = d \frac{(S/\rho)_{TE}}{(S/\rho)_{A150}} + (1-d) \frac{F_{TE}}{F_{A150}}$$

d - פקטור לא נתון שמייצג את חלק הדוזה הנבלעת ב TE כתוצאה מיצירת אלקטרונים משניים בקירות A-150.

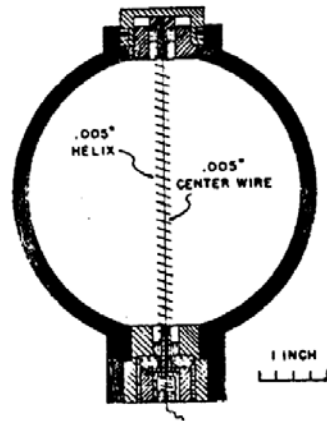
גלאים נבחרים

מונה פרופורציוני כדורי

מונה ותיק לגילוי נויטרונים. המונה פותח על ידי Rossi.

המונה הוא כדור שבתוכו מלופף חוט, ועליו סליל לשם יצירת שדה אחיד. לתוך הכדור מוכנס גז אורגני.

$$\frac{1}{r} \propto \text{השדה החשמלי בכדור}$$



- TISSUE-EQUIVALENT PLASTIC
- ▨ LUCITE
- ▩ ALUMINUM

FIGURE 483. Spherical proportional counter. (From Rossi, H. H. and Rosenzweig, W., *Rad. Res.*, 2, 417, 1955. With permission.)

הדוזה כתלות ב-LET (L=LET):

$$D(L) = \frac{1}{2\pi r^2} \left(\frac{L}{h} \right) \left\{ h^3 \frac{d}{dh} \left[\frac{Q(h)}{h} \right] \right\}$$

h – גובה הפולס הנמדד.

Q(h) – התפלגות גובה הפולס (ספקטרום).

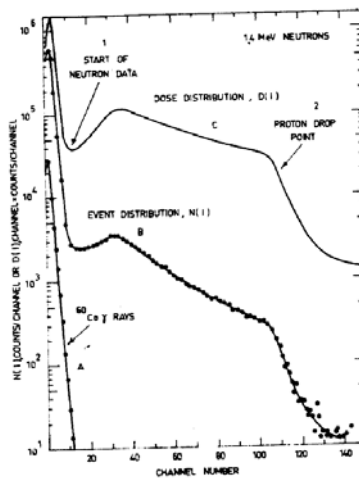


FIGURE 487. Pulse-height spectra from a tissue-equivalent proportional counter exposed to 1.4 MeV neutrons and ⁶⁰Co γ-rays. (From Brackenbush, L. W. et al., *Proc. Symp. Advances in Radiation Protection Monitoring*, IAEA, Vienna, 1979, 231. With permission.)

מיקרו-דוזימטריה: הדמייה של תא חי יחיד באמצעות מונה גזי לשם מדידת דוזה על תא יחיד. משתמשים בגז

בלחץ נמוך שמדמה "ניפוח של התא לממדים של ס"מ $P \approx 10^{-3} \text{ ATM}$.

גלאי **Hurst**: מונה פרופורציוני העשוי משכבות של חומר אורגני מצופה בשכבת מתכת. מיועד בעיקר לנויטרונים מהירים.

הדוזה ביחידות של Gy:

$$D = 1.602 \cdot 10^{-6} \sum_{h_1}^{h_2} \left(\frac{ChN(h)}{\text{MeV}} \right) \left(\frac{\rho}{\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{V}{\text{cm}^3} \right)^{-1}$$

היחידות מסומנות בכחול.

h – גובה הפולס.

ChN(h) – מספרי ערוצים כתלות בהתפלגות גובה הפולס (מכיל).

גבולות הסכימה הם גבולות גובהי פולס שהדוזה נמדדת ביניהם.

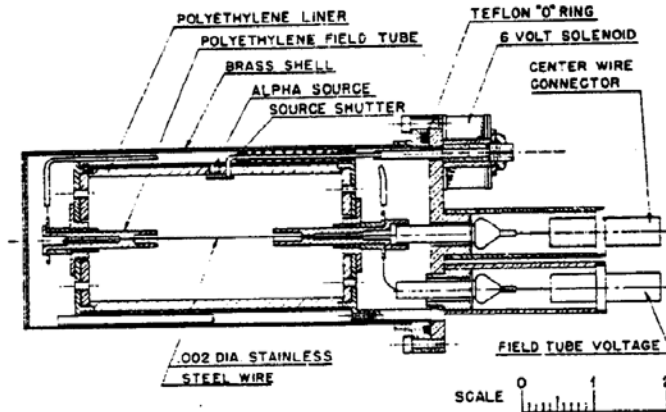


FIGURE 485. Design of the absolute proportional counter for fast-neutron dosimetry (dimensions are in inches). (From Hurst, G. S. and Wagner, E. B., *Selected Topics in Radiation Dosimetry*, IAEA, Vienna, 1961. With permission.)

מונים ניידים

מונים המכילים בורון (B):

נויטרונים חודרים לפלסטיק (פוליאתילן) ומואטים בשכבה זו, ואז מגיעים לגז BF_3 ומבצעים ריאקציה. הנויטרונים נמנים בתוך הגז.

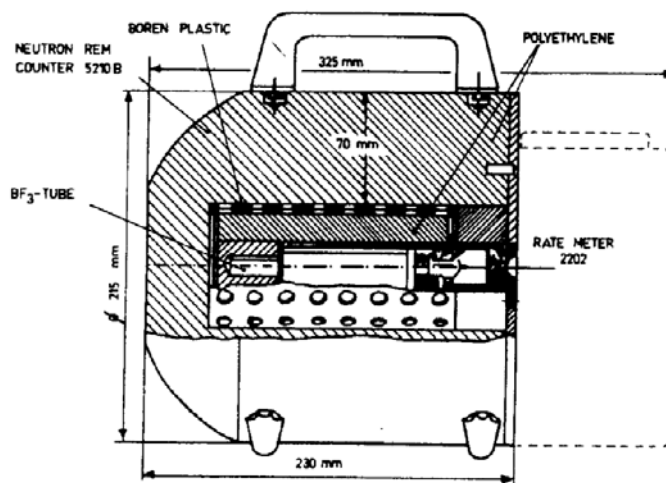


FIGURE 490. Neutron rem counter 2202 D. (From Widell, C. O. and Svansson, L., *Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes*, IAEA, Vienna, 1973, 225. With permission.)

גלאי המתאים מאד לנויטרונים מהירים (הנויטרונים התרמיים נבלעים בפלסטיק).

$$.36 \frac{\text{counts/sec}}{\text{Gy/hr}}$$

רגישות לקרינת גמה: $> 2 \text{ Gy/hr}$.

מונה ספקטרומטרי מסוג Bonner:

דוזימטר כדורי למדידת קרמה ודוזה אקוויוולנטית ליחידת שטף של מקורות נויטרונים.

תחום האנרגיות הניתן לגילוי הוא: $0.01 \text{ eV} - 15 \text{ MeV}$.

המערכת מכילה גלאי נויטרונים תרמיים העשוי מגביש ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ גלילי (4 mm X 4 mm) המכוסה בשכבות כדוריות של פוליאתילן בקטרים של 2 עד 12 אינצ'ים.

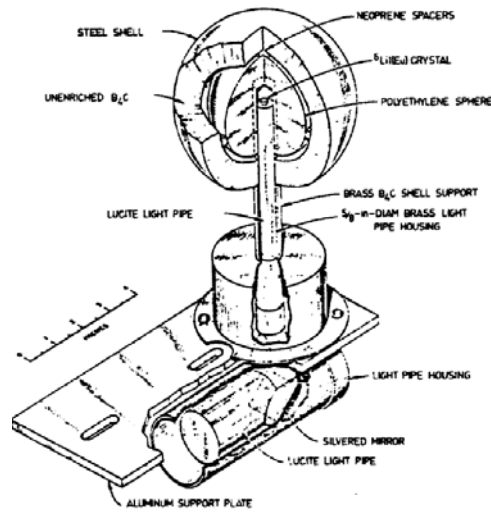


FIGURE 494. Detector arrangement showing the removable boron-covered polyethylene sphere. (From Mehta, S. K. and Burrus, W. R., *Proc. Symp. Radiation Protection Monitoring*, IAEA, Vienna, 1969, 115. With permission.)

תגובת הדוזימטר לפי עובי הפלסטיק המאט:

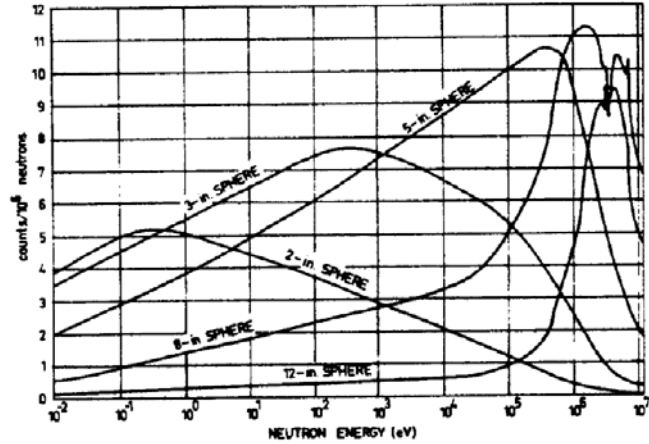


FIGURE 493. Response functions of the Bonner detectors; data are for a point isotropic source at 40 cm. (From Mehta, S. K. and Burrus, W. R., *Proc. Symp. Radiation Protection Monitoring*, IAEA, Vienna, 1969, 115. With permission.)

מכשיר לניטור נויטרונים - "Snoopy":

מכשיר נייד בעל רגישות לתחום רחב של אנרגיות: תרמיים – 15 MeV.

מתאים למדידות דוזה של 2 cGy/hr . רגישות: 80 counts/mGy .

המונה הוא BF_3 באורך 2 אינץ' בתוך מאט גלילי (3 X 5.5 inch) מצופה במנחת העשוי מגומי סינטטי המכיל ^{10}B - ^{11}B .

מבנה הדוזימטר:

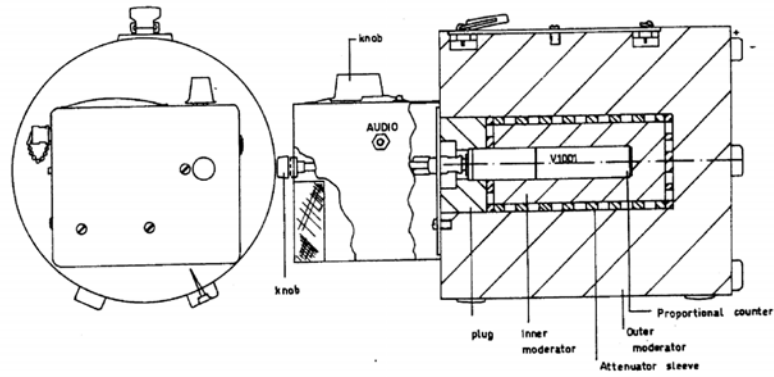


FIGURE 504. Portable neutron monitor — Snoopy. Tracer Lab Co.

המעבר לדוזה למקור במרחק של 50 cm על ידי גורם הכפלה: 85.6 mrem/mV ,

ובמרחק של 100 cm על ידי גורם הכפלה: 21.8 mrem/mV .