Dawką pochłoniętą nazywa się energię przekazaną materii przez promieniowanie jonizujące na jednostkę masy.

„*energia przekazana*" – energia zużyta na jonizację, wzbudzenie, wzrost energii chemicznej lub energii sieci krystalicznej, itd., która ostatecznie daje efekt cieplny – wzrost energii wewnętrznej. Z definicji wyklucza się energię zużytą na wzrost masy spoczynkowej lub zamienionej na promieniowanie jonizujące.

Najwygodniej za energię przekazaną materii uważać energię usuniętą z pola promieniowania – z wyłączeniem energii zużytej na wzrost masy spoczynkowej.

$\Delta E_D = \Delta E_E - \Delta E_L - \Delta E_R$ energia przekazana małej objętości ΔV

ΔE_E - energia wchodząca do objętości ΔV

ΔE_L - energia wychodząca z objętości ΔV

ΔE_R - energia zamieniona w masę spoczynkową w ΔV

Δm - masa zawarta w ΔV

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} \quad \text{dawka pochłonięta}$$

Związek między zdolnością hamowania a dawką pochłanianą dla cząstek naładowanych

$\Phi = \int_0^{T_m} \Phi'(T)dT$ strumień cząstek przechodzących przez krążek o powierzchni dA i grubości dl ($\Delta m = \rho \cdot dA \cdot dl$).

$S(T) \cdot dl$ - energia tracona przez cząstkę na drodze dl

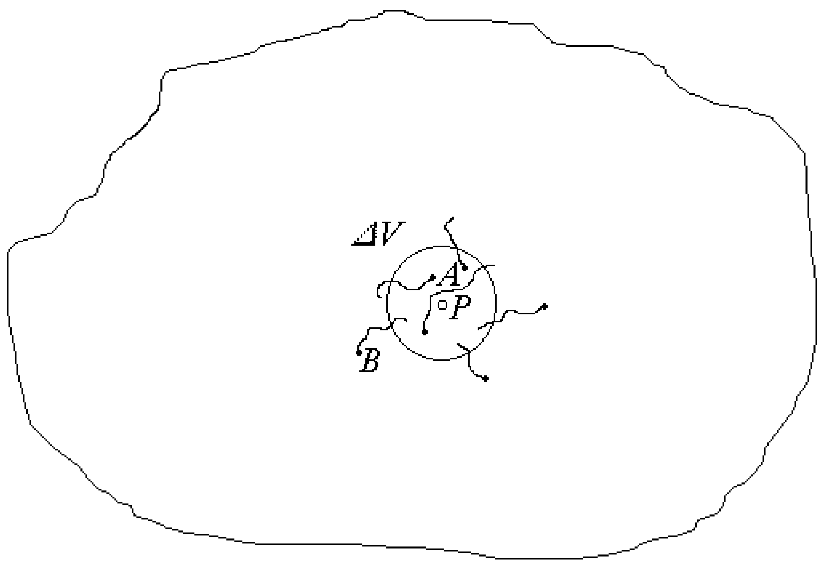
$\Phi'(T) \cdot dA \cdot dT$ - liczba cząstek o energiach $T \in (T, T + dT)$ przechodzących przez krążek

$$D = \frac{\int_0^{T_m} S(T) \cdot \Phi'(T) \cdot dA \cdot dl \cdot dT}{\rho \cdot dA \cdot dl} = \frac{1}{\rho} \int_0^{T_m} S(T) \cdot \Phi'(T) \cdot dT$$

Równowaga promieniowania

$\Delta E_E = \Delta E_L$ w warunkach równowagi czyli $\Delta E_D = -\Delta E_R$

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} = -\frac{\Delta E_R}{\Delta m}$$



Równowaga cząstek naładowanych

$$\Delta E_D = (\Delta E_E)_c - (\Delta E_L)_c + (\Delta E_E)_u - (\Delta E_L)_u - (\Delta E_R)_u \qquad (\Delta E_R)_c = 0$$

$$\Delta E_D = (\Delta E_E)_c - (\Delta E_L)_c + \Delta E_K \qquad \text{gdzie} \quad \Delta E_K = (\Delta E_E)_u - (\Delta E_L)_u - (\Delta E_R)_u$$

$$\boxed{(\Delta E_E)_c = (\Delta E_L)_c}$$ warunek równowagi cząstek naładowanych

$$\boxed{\begin{gathered} \Delta E_D = \Delta E_K \\ D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} = \frac{\Delta E_K}{\Delta m} = K \end{gathered}}$$

Zasięgi promieniowania w tkance

Enegia MeV	protony $R_p(E)$, cm	neutrony $\lambda_n(E)$, cm	elektrony $R_e(E)$, cm	fotony $1/\mu$, cm
0,1	0,00017	0,83	0,014	39
0,3	0,00060	1,7	0,083	32
1,0	0,0029	4,2	0,43	33
3,0	0,016	6,7	1,47	44
10,0	0,14	17	4,9	65
30,0	1,2	33	13,2	—

Dla neutronów podano wartość średniej drogi swobodnej między kolejnymi oddziaływaniami. Wielkość 1/μ ma dla fotonów podobny sens.

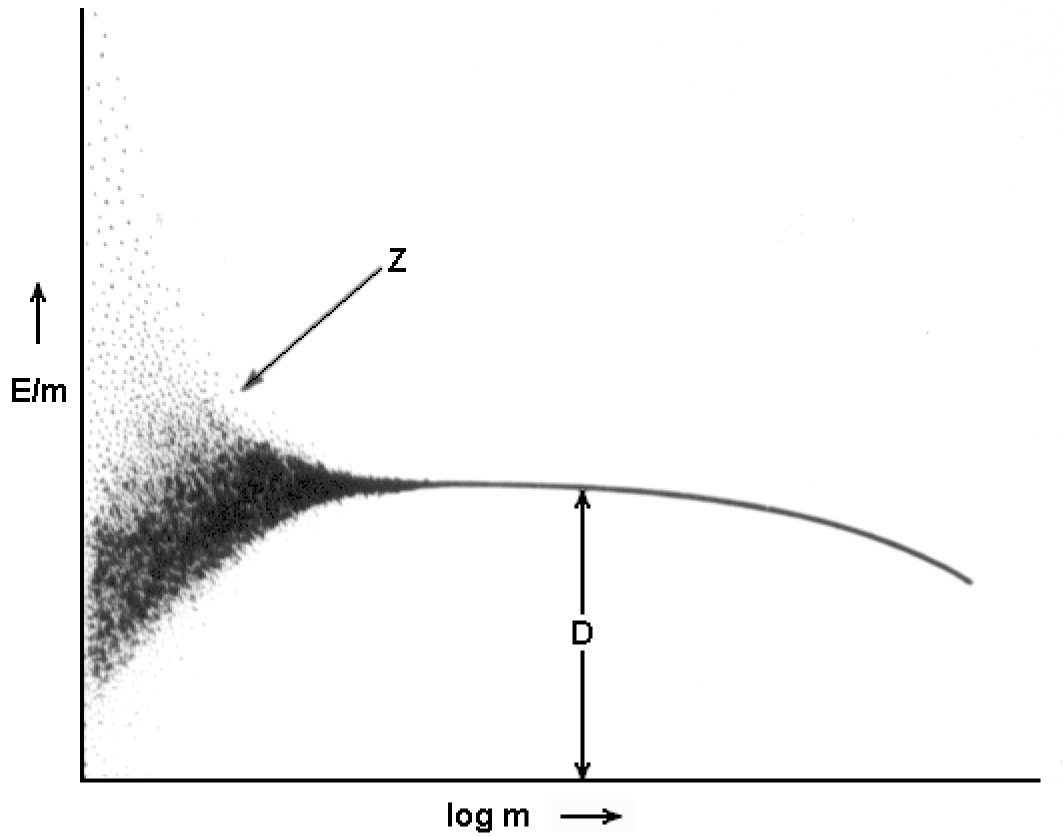
$$K = F\frac{1}{\rho}\int_0^{T_m}\mu'(T')\frac{T'}{T}dT' = F\frac{\mu_K}{\rho}$$

F – całkowy strumień energii γ/n o energii T

Względne straty energii elektronów o energii T (MeV) na promieniowanie hamowania w ośrodku o liczbie atomowej Z

$$\frac{T \cdot Z}{T \cdot Z + 700}$$

Mikrodozymetria



$Z = \frac{E}{m}$ gęstość energii przekazanej ośrodkowi wykazuje silne fluktuacje w małej skali

Linowy przekaz energii (LPE) – LET (linear energy transfer)

$$\boxed{L = \frac{dE_L}{dl}} \qquad \text{[J/m]}$$

$T(L)$ – rozkład względnej długości toru cząstki względem LPE
$T(L) \cdot dL$ – długość toru cząstek o $\text{LPE} \in (L, L + dL)$ podzielona przez całkowitą długość toru tych cząstek

σ – przekrój czynny dla jakiegoś wybranego efektu (zwykle biologicznego, np. inaktywacji komórki) zwykle jest funkcją L. Możemy wtedy mówić o rozkładzie $\sigma(L)$, a efektywny przekrój czynny

$$\sigma_e = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} T(L) \cdot \sigma(L) \cdot dL \qquad \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} T(L) \cdot dL = 1,$$

jeżeli „tarcze" charakteryzowane przez σ są niezależne.

$D(L)$ – rozkład względnej dawki pochłoniętej od wartości LPE promieniowania
$D(L) \cdot dL$ – dawka przekazana przez cząstki o $\text{LPE} \in (L, L + dL)$ podzielona przez całkowitą dawkę przekazaną przez te cząstki

$$R = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} D(L) \cdot r(L) \cdot dL \qquad \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} D(L) \cdot dL = 1,$$

$r(L)$ – względna skuteczność biologiczna promieniowania o LPE równym L
R – efektywna WSB całego promieniowania o określonym rozkładzie $D(L)$

Względna skuteczność biologiczna WSB – (RBE - relative biological effectiveness)
Jeżeli skutek biologiczny po pochłonięciu dawki promieniowania D_R jest taki sam jak po pochłonięciu dawki D_S promieniowania wzorcowego (odniesienia), to względna skuteczność tego promieniowania wynosi:

$$R = \frac{D_S}{D_R} \qquad R \geq 1$$

Związek między rozkładami $D(L)$ i $T(L)$

Jeżeli w ośrodku została pochłonięta jednostkowa dawka i K jest całkowitą długością torów wszystkich cząstek naładowanych w jednostce masy ośrodka, to

$K \cdot T(L) \cdot dL$ – długość torów cząstek o LEP $\in (L, L+dL)$
$K \cdot T(L) \cdot L \cdot dL$ – energia przekazana przez cząstki o LEP $\in (L, L+dL)$

Ponieważ masa jest jednostkowa, to dla wartości zachodzi związek

$$K \cdot T(L) \cdot L \cdot dL = D(L) \cdot dL$$

i wartość K można obliczyć całkując ten związek

$$K = \frac{1}{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} T(L) \cdot L \cdot dL} = \frac{1}{\overline{L_T}} \qquad \overline{L_T} = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} T(L) \cdot L \cdot dL$$

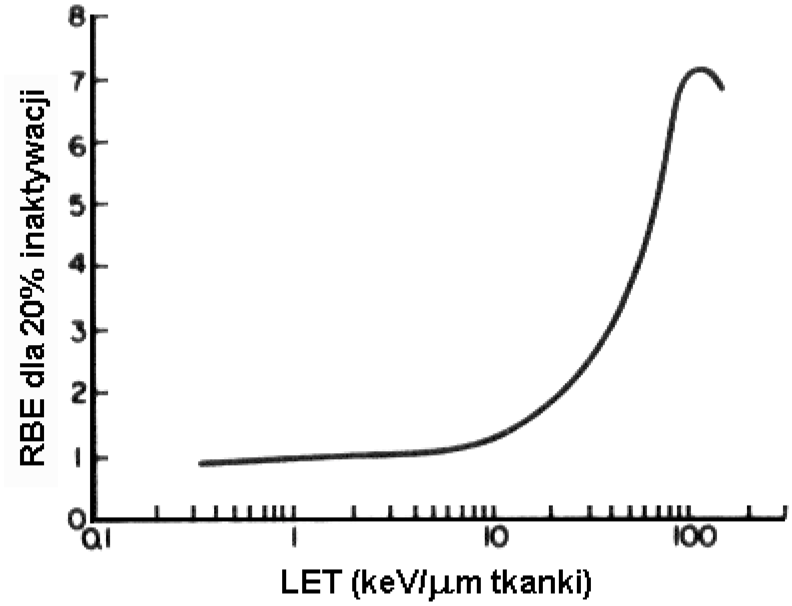
$\overline{L_T}$ - jest średnią wartością LPE ze względu na długość torów cząstek, a związek między rozkładami jest następujący

$$\boxed{D(L) = \frac{T(L) \cdot L}{\overline{L_T}}}$$

Inne średnie wartości LPE

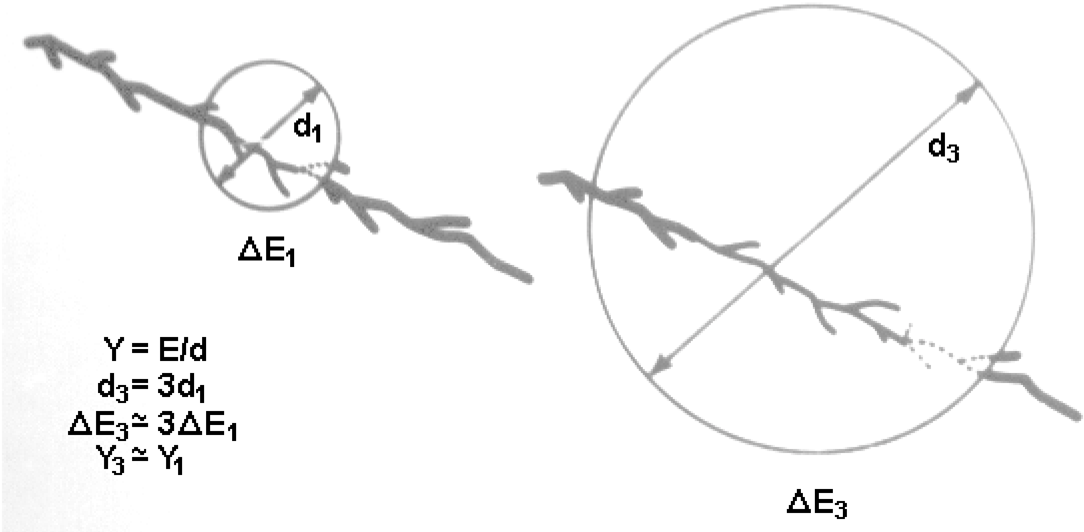
$$\overline{L_D} = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} D(L) \cdot L \cdot dL$$

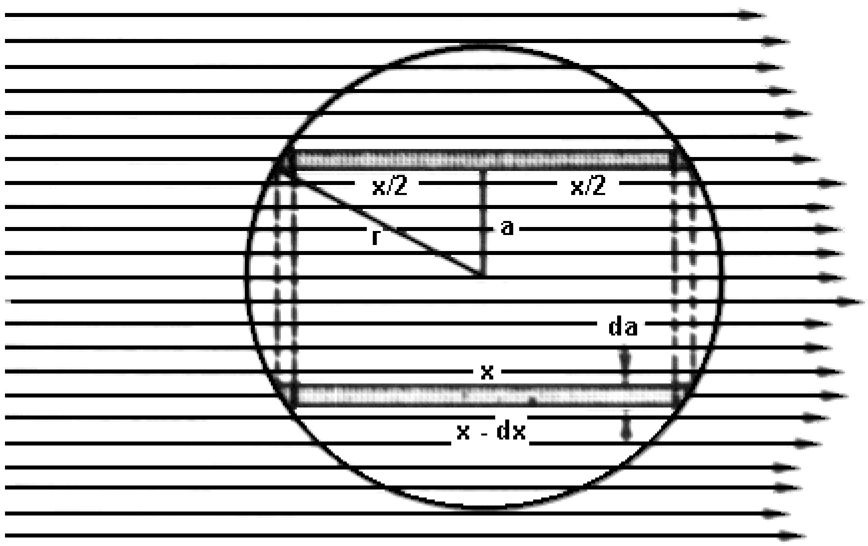
Używanie średnich wartości L ($\overline{L_T}$, $\overline{L_D}$) ma sens tylko wtedy, gdy wielkości charakteryzujące oddziaływanie (σ, WSB) są proporcjonalne do L.

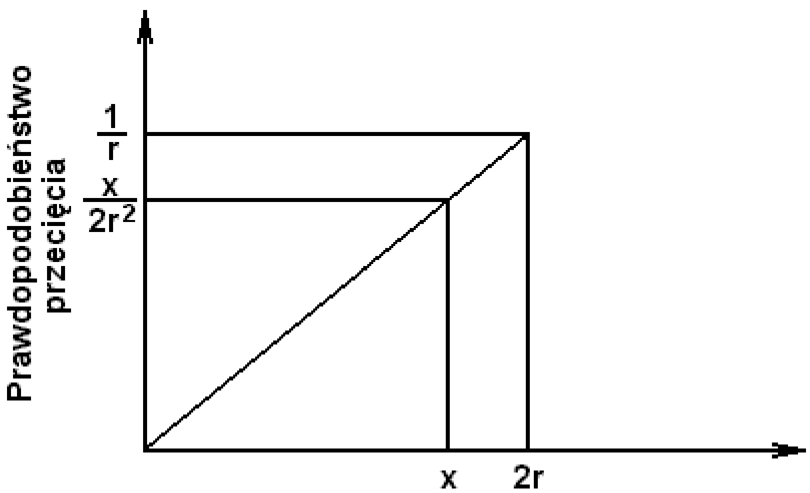


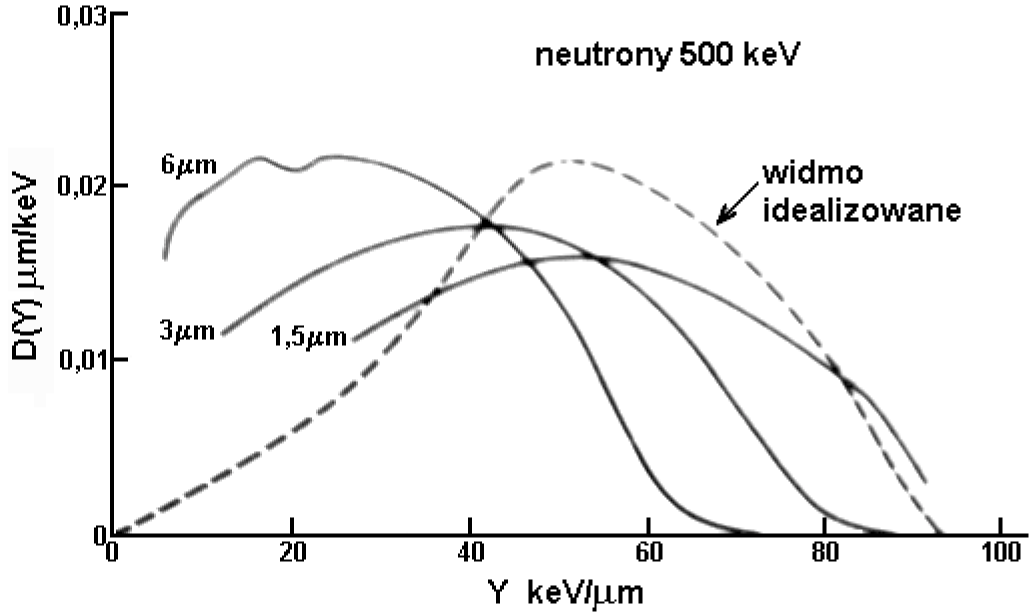
Rozkład WSB względem LPE dla 20% inaktywacji komórek tkanek ssaka w hodowli.

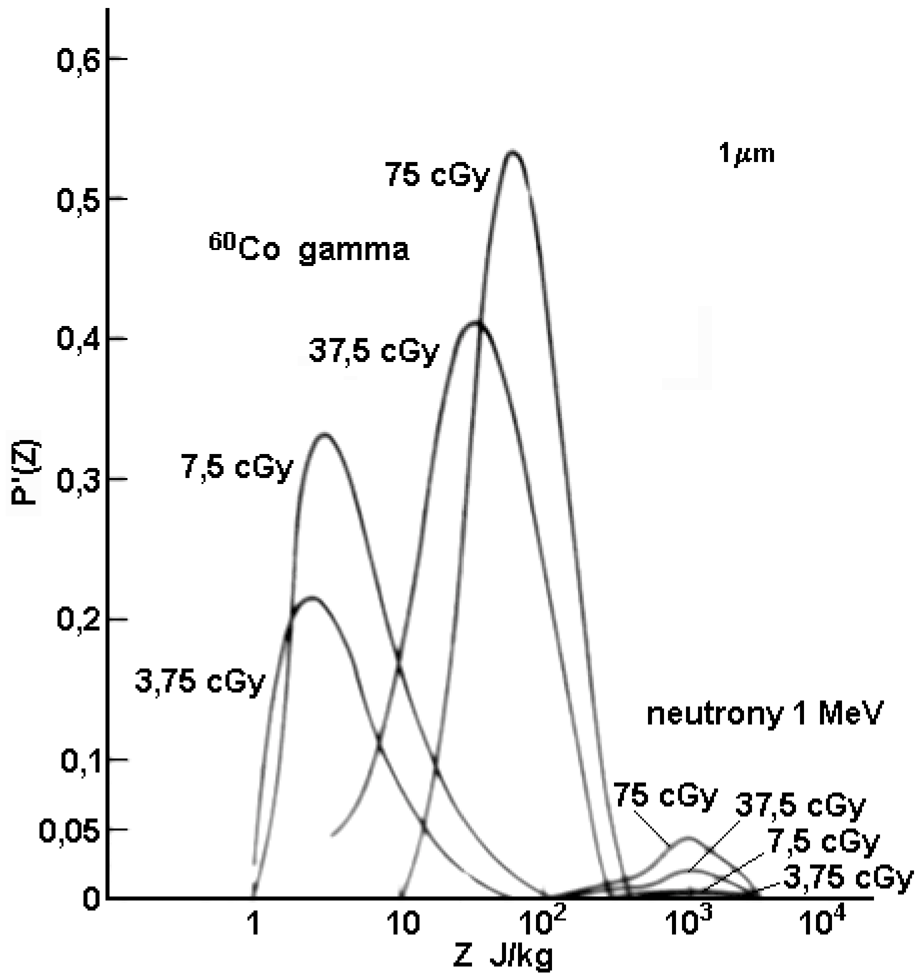
Wielkość zdarzenia *Y*








0,03
neutrony 500 keV
6μm
widmo
idealizowane
D(Y) μm/keV
0,02
3μm
1,5μm
0,01
0
0
20
40
60
80
100
Y keV/μm


0,6
1μm
75 cGy
0,5
60Co gamma
0,4
37,5 cGy
7,5 cGy
P'(Z)
0,3
0,2
3,75 cGy
neutrony 1 MeV
0,1
75 cGy
37,5 cGy
0,05
7,5 cGy
3,75 cGy
0
1
10
10^2
10^3
10^4
Z J/kg