Dozymetria promieniowania jonizującego

Zasada dozymetrii

Dawka pochłonięta

$$E_E - E_L = -\oint_A d\vec{A} \int dT \int d\Omega\, \Phi^{'}(T,\vec{\Omega})\, T\vec{\Omega} = -\oint_V dV \int dT \int d\Omega\, \vec{\Omega} \cdot \nabla \Phi^{'}\, T$$

$$-\frac{1}{\rho} \int dT \int d\Omega\, \vec{\Omega} \cdot \nabla \Phi^{'}(T,\vec{\Omega})\, T = -\frac{1}{\rho} \nabla \int dT \int d\Omega\, \vec{\Omega}\, T\, \Phi^{'}(T,\vec{\Omega}) = -\frac{1}{\rho} \nabla \vec{G}$$

$$\vec{G} \equiv \int dT \int d\Omega\, \vec{\Omega}\, T\, \Phi^{'}(T,\vec{\Omega})$$

$$D = E - Q - \frac{1}{\rho} \nabla \vec{G}$$

$$E = \frac{1}{\rho} \int dT \int d\Omega\, S^{'}(T,\vec{\Omega})\, T$$

$$D = \frac{1}{\rho} \int dT \int d\Omega\, S^{'}(T,\vec{\Omega})\, T - Q - \frac{1}{\rho} \nabla \int dT \int d\Omega\, \vec{\Omega}\, \Phi^{'}(T,\vec{\Omega})\, T$$

jeżeli założymy brak oddziaływań prowadzących do zmiany masy spoczynkowej – $Q = 0$ i uwzględnimy równanie transportu bez czasu

$$\vec{\Omega}\, \nabla \Phi^{'}(T,\vec{\Omega}) = -\mu\, \Phi^{'}(T,\vec{\Omega}) + S^{'}(T,\vec{\Omega}) + \int dT^{''} \int d\vec{\Omega}^{''}\, \Phi^{'}(T^{''},\vec{\Omega}^{''})\, \mu^{'}(T,\vec{\Omega};T^{''},\vec{\Omega}^{''})$$

to otrzymamy

$$D = \frac{1}{\rho} \int dT \int d\Omega\, S^{'}(T,\vec{\Omega})\, T - \frac{1}{\rho} \int dT \int d\Omega\, T \left[-\mu\, \Phi^{'} + S^{'} + \int dT^{''} \int d\vec{\Omega}^{''}\, \Phi^{'}(T^{''},\vec{\Omega}^{''})\, \mu^{'}(T,\vec{\Omega};T^{''},\vec{\Omega}^{''}) \right]$$

$$\boxed{D = \frac{1}{\rho} \int dT \mu\, \Phi^{'}(T)\, T - \frac{1}{\rho} \int dT \int dT^{''} \Phi^{'}(T^{''})\, \mu^{'}(T;T^{''})\, T}$$

Dozymetria promieniowania jonizującego

Przybliżenie dla promieniowania cząstek naładowanych jednego rodzaju

dla $Q = 0$

$$D = E - \frac{1}{\rho}\nabla\vec{G}$$

$$D = \frac{1}{\rho}\int dT \int d\Omega\, S^{'}(T,\vec{\Omega})\, T - \frac{1}{\rho}\nabla\int dT \int d\Omega\, \vec{\Omega}\, T\, \Phi^{'}$$

po podstawieniu $\nabla\Phi^{'}(T,\vec{\Omega})$ i scałkowaniu po wszystkich kierunkach

$$D = \frac{1}{\rho}\left[\int dT\mu\, \Phi^{'}(T)\, T - \int dT \int dT^{''}\Phi^{'}(T^{''})\, \mu^{'}(T;T^{''})\, T\right]$$

korzystamy ze związku

$$\mu(T) = \int dT^{''} \int d\Omega^{''} \mu^{'}(T^{''},\vec{\Omega}^{''};T,\vec{\Omega}) = \int dT^{''} \mu^{'}(T^{''};T)$$

$$D = \frac{1}{\rho}\int dT\, \Phi^{'}(T) \int dT^{''} \mu^{'}(T^{''};T)\left[T - T^{''}\right]$$

$$-\frac{dT}{dx} = \int dT^{''} \mu^{'}(T^{''},T)\,[T - T^{''}]$$

Dawka pochłonięta dla cząstek naładowanych wynosi

$$D = \int dT\, \Phi^{'}(T)\left[-\frac{1}{\rho}\frac{dT}{dx}\right]$$

Przybliżenie dla dwóch rodzajów promieniowania
(np. fotony i wtórne elektrony)

$$S_2' = 0$$

$$D = \frac{1}{\rho}\Big[\int dT_1 \mu\, \Phi_1'(T_1) T_1 - \int dT_1 \int dT_1'' \Phi_1'(T_1'')\mu'(T_1;T_1'')T_1$$
$$- \int dT_1 \int dT_2'' \Phi_2'(T_2'')\mu'(T_1;T_2'')T_1 - \nabla\vec{G}_2\Big] - Q$$

$$Q = \frac{1}{\rho}\Big[\int dT_1 \int dT_1'' \Phi_1'(T_1'')\mu'(T_1;T_1'')\, q_1(T_1;T_1'') +$$
$$\int dT_1 \int dT_2'' \Phi_2'(T_2'')\mu'(T_1;T_2'')\, q_2(T_1;T_2'')\Big]$$

Po podstawieniu zmianie kolejności całkowania i oznaczeń zmiennych całkowania

$$D = \frac{1}{\rho}\Big[\int dT_1 \Phi_1'(T_1) \int dT_1'' \mu'(T_1'';T_1)\left\{T_1 - T_1'' - q_1\right\} -$$
$$\int dT_2 \Phi_2'(T_2) \int dT_1'' \mu'(T_1'';T_2)\left\{T_1'' + q_2\right\} - \nabla\vec{G}_2\Big]$$

1 – fotony / neutrony
2 – wtórne cząstki naładowane

$$\mu_K = \frac{1}{T_1}\int dT_1'' \mu'(T_1'';T_1)\left\{T_1 - T_1'' - q_1\right\}$$

$$K = \int dT_1\, \Phi_1'(T_1)\, T_1 \frac{\mu_K}{\rho}$$

$$\int dT_1'' \mu'(T_1'';T_2)(T_1'' + q_2) = -\left[\frac{dT_2}{dx}\right]_B$$

$$B = \int dT_2\, \Phi_2'(T_2)\left[-\frac{1}{\rho}\frac{dT_2}{dx}\right]_B$$

$$D = K - B - \frac{1}{\rho}\nabla\vec{G}_2$$

1 –cząstki naładowane
2 – pierwotne fotony / neutrony

$$D = \frac{1}{\rho}\int dT_1\, \Phi_1'(T_1)\left\{\left[-\frac{dT_1}{dx}\right] - \left[-\frac{dT_1}{dx}\right]_B\right\}$$

Nieskończony ośrodek jednorodny z równomiernym rozkładem źródeł

Ze względu na symetrię równanie transportu upraszcza się

$$\boxed{\mu(T)\,\Phi^{'}(T) = S^{'} + \int_{T}^{\infty} dT^{''} \Phi^{'}(T^{''})\,\mu^{'}(T;T^{''})}$$

$$\mu(T) = \int dT^{''} \int d\Omega^{''} \mu^{'}(T^{''},\vec{\Omega}^{''};T,\vec{\Omega})$$

$$\int_{T}^{\infty} dT^{''} \left[\Phi^{'}(T^{''}) \int_{0}^{T^{''}} dT^{*} \mu^{'}(T^{*};T^{''}) \right] = \int_{T}^{\infty} dT^{''} S^{'}(T^{''}) \qquad (46)$$

Przybliżenie ciągłego spowalniania (cząstek naładowanych)

$$\vec{\Omega}\cdot\nabla\Phi^{'}(p,\vec{\Omega}) = S^{'} - \frac{\partial\Phi^{'}}{\partial p} + \int d\vec{\Omega}^{''} \left[\Phi^{'}(p,\vec{\Omega}^{''}) - \Phi^{'}(p,\vec{\Omega})\right]\mu^{'}(\vec{\Omega},\vec{\Omega}^{''})$$

r.t. redukuje się do

$$\frac{\partial\Phi^{'}(p)}{\partial p} = S^{'}(p)$$

$$p(T) = -\int_{0}^{T} dT^{''} \left[\frac{dT^{''}}{dx}\right]^{-1}$$

$$\Phi^{'}(T) = -\left(\frac{dT}{dx}\right)^{-1} \int_{T}^{\infty} dT^{''} S^{'}(T^{''}) \qquad \frac{dp}{dT} = -\left(\frac{dT}{dx}\right)^{-1}$$

dla źródeł monoenergetycznych

$$S(T) = S\cdot\delta(T_0)$$

$$\Phi^{'}(T) = -\left(\frac{dT}{dx}\right)^{-1}\cdot S \qquad (49)$$

$$\int_0^\infty dT\Phi'(T)\underbrace{\int_0^T dT''\mu'(T'';T)[T-T'']}=\int_0^\infty dTS'(T)\,T=E\cdot\rho \tag{50}$$

$$\boxed{\int_0^\infty dT\Phi'(T)\left(\frac{-1}{\rho}\frac{dT}{dx}\right)=E} \tag{51}$$

również i dla fotonów, średnio, musi zachodzić

$$\Phi'(h\nu)=\frac{S}{h\nu\cdot\mu_K} \tag{52}$$

$$\mu_K=\frac{1}{T}\int dT''\mu'(T'';T)\,[T-T'']$$

dla neutronów praktycznie stały jest dekrement logarytmiczny

$$\xi=\frac{1}{\mu}\int_0^T dT''\mu'(T'';T)\ln\left(\frac{T}{T''}\right) \tag{53}$$

co oznacza quasi-ciągłą zmianę ln(T)

$$\Phi'(T)=\frac{S}{T\,\mu\,\xi} \tag{54}$$

Równowaga cząstek naładowanych.

$$\int_{T}^{\infty} dT'' \Phi'(T'') \int_{0}^{T''} dT^{*} \mu'(T^{*};T'') = \int_{T}^{\infty} dT'' S'(T'') + \int_{2T}^{\infty} dT'' \Phi'(T'') \int_{T}^{T''/2} dT^{*} \mu'(T'' - T^{*};T'') \qquad (55)$$

Fotony i neutrony

$$\Phi(T_0) = \frac{S(T_0)}{\mu(T_0)} \qquad (56)$$

$$S'(T) = \Phi(T_0)\, \mu(T;T_0)$$

$$\mu\, \Phi'(T) = \frac{S(T_0)}{\mu(T_0)} \mu'(T;T_0) + \int_{T}^{T_0} dT'' \Phi'(T'') \mu'(T;T'') \qquad (57)$$

Dozymetria promieniowania jonizującego

Nierównomierne rozkłady źródeł.

Proste geometrie źródeł

punktowe źródło jednokierunkowe – PM

- punktowe źródło izotropowe (PI)
- planarne źródło jednokierunkowe (SM)
- planarne źródło izotropowe (SI)
-

Związki między rozkładami dawek dla prostych geometrii źródeł

$$D_{SI}(z) = 2\pi \int_z^\infty dr\, D_{PI}(r)\, r$$

$$D_{PI}(r) = \frac{-1}{2\pi\, r} \left.\frac{dD_{SI}}{dz}\right|_{z=r}$$

$$D_{SMP}(z) = 2\pi \int_0^\infty d\rho\ \rho\ D_{PM}(\rho, z)$$

$$D_{PI}(r) = \frac{1}{2} \int_0^\pi d\theta\, \cos\theta\ D_{PM}(r\sin\theta, r\cos\theta)$$

Dozymetria promieniowania jonizującego

Oddziaływanie neutronów z materią

1. rozpraszanie sprężyste na protonach (H) oraz jądrach C, O, N (E < 20 MeV)
2. wychwyt neutronu termicznego (E ~ 0,025 eV)
   $N^{14}(n,p)C^{14}$ Q = 0,62 MeV
   $H^{1}(n,\gamma)H^{2}$ Q = 2,2 MeV
3. rozpraszanie niesprężyste (E > 2,5 MeV)
   $(n,n^{'}\gamma)$
4. rozpraszanie niesprężyste (E > 5 MeV)
   (n,p) (n,α)
5. spallacja (kruszenie) jąder (E > 100 MeV)

Reakcja	Energia kwantu(ów) γ[MeV]
$O^{16}(n,n^{'})O^{16*}$	6,1 7,0 3,8 4,8
$O^{16}(n,\alpha)C^{13}$	
$O^{16}(n,\alpha)C^{13*}$	3,1 3,8 7,0
$O^{16}(n,p)N^{16}$	