ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1967
Seria: MATEMATYKA - FIZYKA z. 12 Nr kol. 199

WŁADYSŁAW ŁUKASZEK
Katedra Teorii Maszyn Cieplnych

ANALIZA FOTONÓW W ZJAWISKU ZWARCIA PROMIENIOWANIA

Streszczenie. W pracy opisane zostało zjawisko zwarcia promieniowania. Wykorzystuje się wyniki obliczeń osłabienia promieniowania gamma uzyskane przez autora przy pomocy metody Monte-Carlo i podaje się przykład fotonu który bierze udział w omawianym zjawisku.

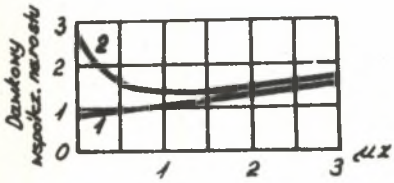
1. Zjawisko krótkiego zwarcia promieniowania

Z istniejących w literaturze informacji wynika, że w przypadku promieniowania gamma padającego ukośnie na płytę, stosowanie do obliczeń danych dotyczących normalnego padania, prowadzi do złych wyników. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia, gdy:

a) płyta złożona jest z kilku jednorodnych warstw różniących się znacznie współczynnikami oddziaływania,

b) droga w osłonie promieniowania padającego ukośnie jest dostatecznie mała,

c) rozkład kątowy promieniowania jest taki, że znaczna ilość promieniowania nie jest normalna ani nie jest bliska kierunkowi normalnemu w stosunku do płyty.



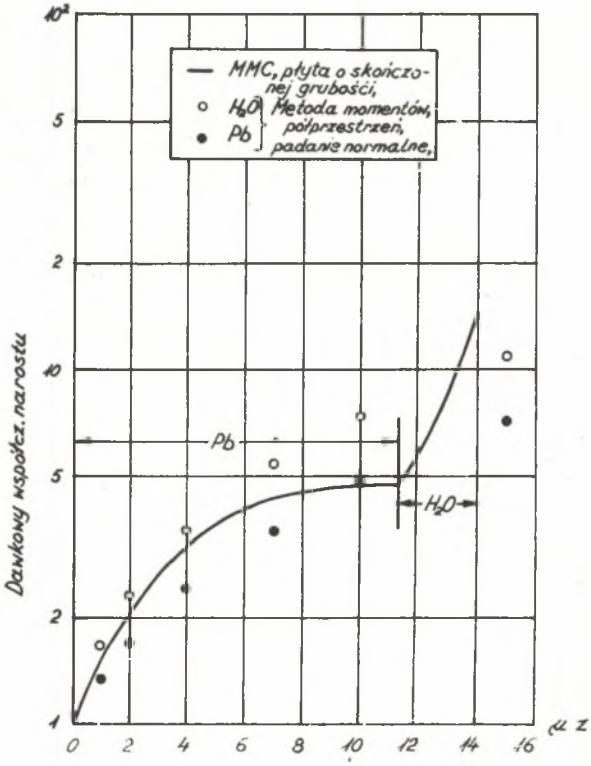
Rys. 1. Dawkowe współczynniki narostu dla promieniowania gamma [2]

Krzywa 1 - dotyczy odległości w ołowiu mierzonych za warstwą ołowiu o grubości równej trzem długościom relaksacji

Krzywa 2- dotyczy odległości w ołowiu mierzonych za warstwą wody o grubości równej trzem długościom relaksacji

Sytuacje tego rodzaju stanowią przykłady zjawiska zwarcia promieniowania (short circuiting). Zjawisko zwarcia badane jest obecnie teoretycznie i eksperymentalnie.

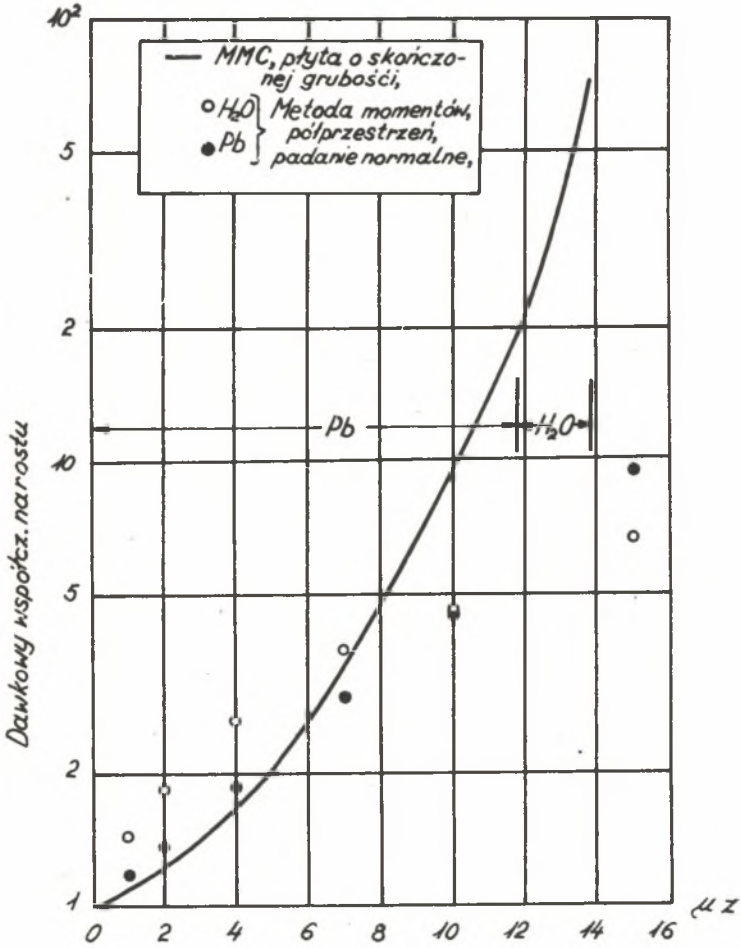
M.H. Kalos [2] wyznaczył dawkowe współczynniki narostu dla promieniowania gamma o energii 1 MeV padającego normalnie na płytę ołowiu oraz na osłonę złożoną z warstwy wody i ołowiu. Obliczenia dla osłony z ołowiu (krzywa 1 z rys. 1) wykonane zostały metodą momentów, natomiast obliczenia dla osłony z warstwy wody i ołowiu (krzywa 2 z rys. 1) przeprowadzono metodą Monte-Carlo (MMC).



Rys. 2. Dawkowe współczynniki narostu dla promieniowania gamma o energii 3 MeV padającego pod kątem 60° na osłonę z warstwy ołowiu i wody o skończonej grubości [1].

W przypadku reprezentowanym krzywą 2 występuje zmniejszenie współczynnika narostu wywołane znacznym pochłanianiem przez ołów tych fotonów, które zostały rozproszone w wodzie. W miarą wzrostu odległości krzywa 2 zbliża się do krzywej 1 która dotyczy jednorodnej osłony ołowianej.

S. Auslender [1] zajmował się przypadkiem promieniowania gamma padającego ukośnie. Na rys. 2 i 3 pokazane zostały wyniki obliczeń MMC dawkowego współczynnika narostu dla fotonów



Rys. 3. Dawkowe współczynniki narostu dla promieniowania gamma o energii 6 MeV padającego pod kątem 60° na osłonę z warstwy ołowiu i wody o skończonej grubości [1]

o energii 3 i 10 MeV padających ukośnie pod kątem 60° na płaską osłonę złożoną z warstwy wody i ołowiu. Wyniki obliczeń MMC porównane z obliczeniami wykonanymi metodą momentów (dla wody i ołowiu) przy normalnym padaniu promieniowania wykazują wzrost współczynnika w głębi osłony. W przypadku fotonów o energii 6 MeV obserwuje się wyraźne zmniejszenie współczynnika w pobliżu płaszczyzny padania.

Zjawiskiem zwarcia i ukośnym padaniem promieniowania zajmowali się ponadto F.S. Kirn, R.J. Kennedy, H.O. Wyckoff (źródła Co-60, Cs-137, Au-198, osłony z betonu, ołowiu i polietylenu) [3], [4] i G.H. Peebles (metoda wielokrotnych rozproszeń dla wyznaczania wielkości współczynników narostu) [5].

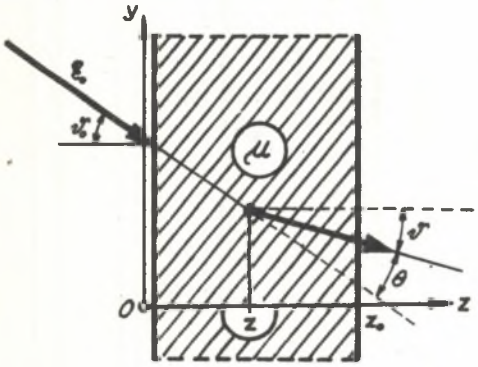
2. Analiza zjawiska zwarcia

W przypadku osłony płaskiej na którą promieniowanie gamma o energii ε_o pada ukośnie pod kątem ϑ_o, można postawić następujące pytanie (rys. 4):

Pod jakimi kątami korzystne są rozproszenia fotonów w punkcie z znajdującym się wewnątrz płyty aby była spełniona zależność:

$$\varepsilon_o\, e^{-\mu(\varepsilon_o)(z_o-z)\sec\vartheta_o} \leq$$

$$\leq \varepsilon\, e^{-\mu(\varepsilon)(z_o-z)\sec\vartheta} \qquad (1)$$



Rys. 4. Ilustracja wzoru (1)

gdzie:

ε_o – energia fotonu przed rozproszeniem, MeV,

ε – energia fotonu po rozproszeniu, MeV,

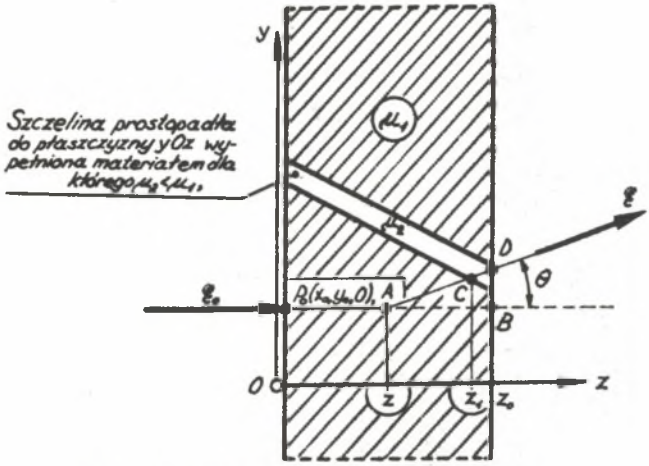
$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_o}{1 + \frac{\varepsilon_o}{0{,}51}(1 - \cos\theta)}$$

θ – kąt rozproszenia,

$\mu(\varepsilon)$ - liniowy współczynnik oddziaływania jako funkcja energii fotonu, cm^{-1},

ϑ - kąt pomiędzy fotonem i osią z.

Lewa strona nierówności (1) może być interpretowana jako przeciętna energia przenoszona na zewnątrz ośrodka przez jeden foton wiązki na drodze równej $(z_o - z)\sec\vartheta_o$, tzn. wzdłuż toru wiązki padającej. Strona prawa oznaczać będzie energię przeciętną przenoszoną przez foton na drodze $(z_o - z)\sec\vartheta$, tzn. wzdłuż toru wiązki rozproszonej.



Rys. 5. Ilustracja wzoru (2)

Pytanie podobne do poprzedniego można postawić w przypadku geometrii pokazanej na rys. 5. Dla fotonu pokazanego na tym rysunku uzyskuje się odpowiednio:

$$\varepsilon_o e^{-\mu_1(\varepsilon_o)(z_o-z)} \leq \varepsilon_e^{-\mu_1(\varepsilon)(z_1-z)\sec\theta-\mu_2(\varepsilon)(z_o-z_1)\sec\theta} \tag{2}$$

gdzie: indeks przy μ określa materiał ośrodka którego dotyczy liniowy współczynnik oddziaływania.

Rozproszenia, w których ujawnia się zależność (1) lub (2) nazywać się będzie dalej rozproszeniami zachowawczymi.

Na rys. 5 jest dobrze widoczne dla zaznaczonego fotonu, że pomimo zwiększenia drogi fotonu rozproszonego (AD > AB) i mimo zmniejszenia energii fotonu, nie zyskuje się na osłabieniu. Rysunek ten może być podstawą do poglądowego stwierdzenia, że przy zjawisku zwarcia, promieniowanie wybiera drogi dłuższe geometrycznie ale mniej osłabiające wiązkę. W efekcie końcowym energia przenoszona na zewnątrz osłony po drodze AD jest większa od przenoszonej po drodze AB.

Nierówność (2) może być zapisana przy pomocy prawdopodobieństw nieoddziaływania $P(\varepsilon)$ w postaci

$$\varepsilon_0 P(\varepsilon_0) \leq \varepsilon P(\varepsilon), \tag{3}$$

skąd waga zwarcia

$$w_{zwarcia} = \frac{\varepsilon P(\varepsilon)}{\varepsilon_0 P(\varepsilon_0)}. \tag{4}$$

W związku z zależnością (4) można przyjąć następującą interpretację:

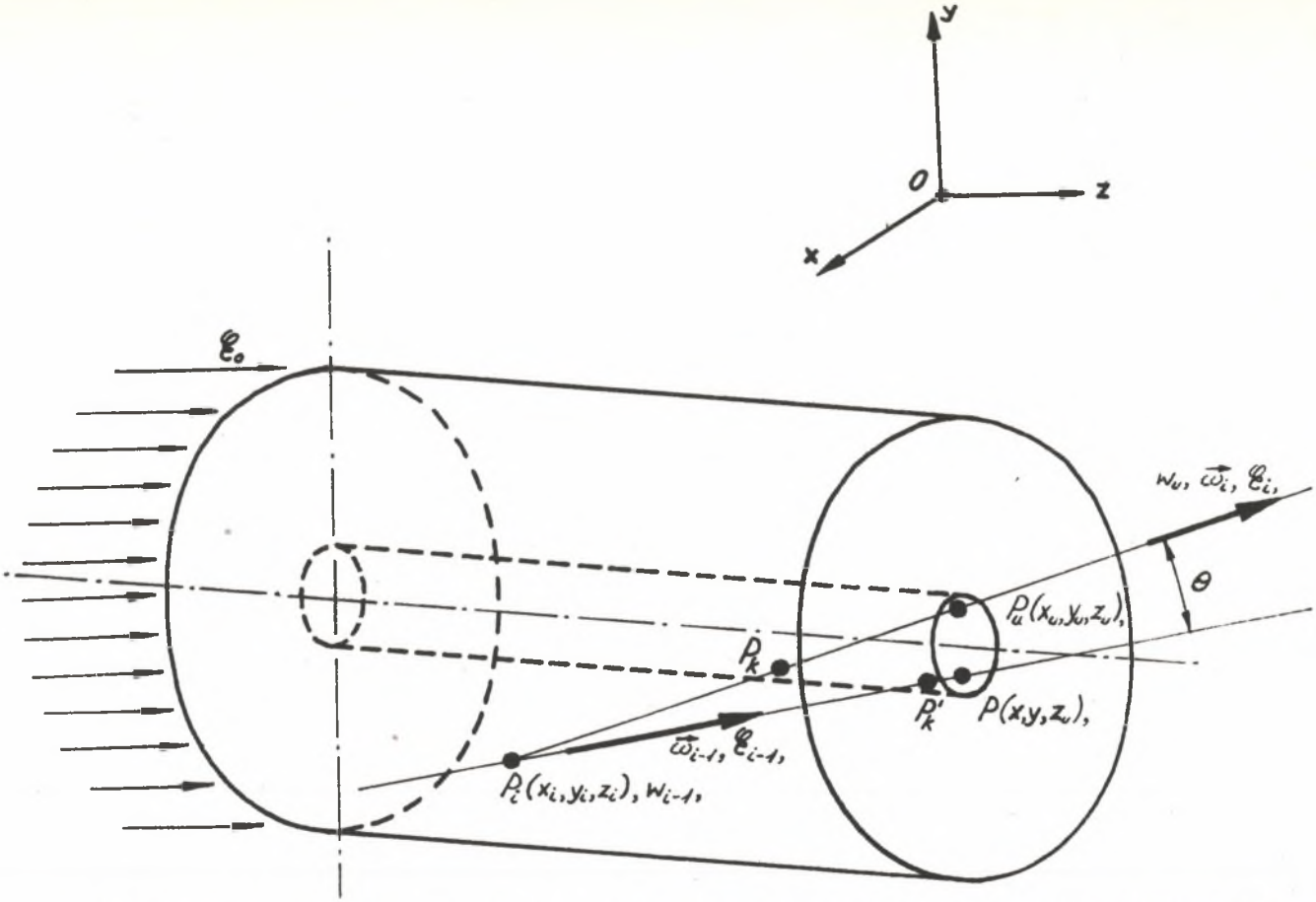
Foton bierze udział w zjawisku zwarcia, jeżeli przy rozproszeniu w pewnym punkcie P_i okaże się, że

$$w_{zwarcia} > 1.$$

3. Zastosowanie metody Monte-Carlo

W obliczeniach pt. "Analiza osłabienia promieniowania gamma przy pomocy obliczeń wykonanych metodą Monte-Carlo", stanowiących przedmiot pracy doktorskiej autora wskazać można fotony biorące udział w zjawisku zwarcia. Promotorem pracy doktorskiej jest doc. dr n.t. Józef Szpilecki.

Obliczenia zostały wykonane na maszynie cyfrowej "Elliott - 803 B" dla ośrodka materialnego o geometrii pokazanej na rys. 6. Ośrodek ten może być interpretowany jako fragment wycięty z płaskiej osłony betonowej o grubości a_p. Wycięcia dokonuje się przy pomocy powierzchni cylindrycznej w taki spo-



Rys. 6. Geometria ośrodka materialnego dla którego wykonane zostały obliczenia osłabienia promieniowania gamma metodą Monte-Carlo

sób, że płaskie ściany fragmentu są okręgami o promieniu K. Niejednorodność fragmentu spowodowana jest kanałem cylindrycznym wypełnionym powietrzem. Oś kanału względem ścian płaskich nachylona jest pod kątem δ. Przekrój kanału płaszczyzną prostopadłą do osi jest kołem o promieniu R_o. Na jedną z płaskich ścian fragmentu, zwaną dalej ścianą wewnętrzną, padają prostopadle fotony o energii $\mathcal{E}_o$ = 2 MeV. Prostokątny układ współrzędnych przyjęty został w taki sposób jak zostało to pokazane na rys. 6. Początek układu ulokowany został na ścianie wewnętrznej w geometrycznym środku wlotu kanału.

Zgodnie z programem obliczeń dla każdego analizowanego fotonu uciekającego przez ścianę zewnętrzną drukowane były pewne parametry związane z punktem ucieczki oraz pewne parametry związane z punktem rozproszenia poprzedzającym ucieczkę fotonu.

Obliczenia zostały wykonane w trzech wariantach. Dla drugiego wariantu przyjęto:

$$\delta = 35^o, \quad R_o = 2{,}5 \text{ cm}, \quad K = 20 \text{ cm}, \quad a_p = 20 \text{ cm}.$$

Łączna liczba fotonów przeanalizowanych w zakresie wariantu drugiego wynosiła 2500.

Dla fotonu o numerze kolejnym 849 wydrukowane zostały przez maszynę cyfrową następujące wyniki:

a) związane z punktem ucieczki:

Energia	$\mathcal{E}_i$ =	1,84 MeV
Cosinus kąta toru fotonu z osią z	ω'''_i =	0,966
Odcięta punktu ucieczki	x_u =	-12,84
Rzędna punktu ucieczki	y_u =	0,59
Waga ucieczki	w_u =	0,4515

b) związane z punktem rozproszenia poprzedzającym ucieczkę:

Energia	$\mathcal{E}_{i-1}$ =	1,99 MeV
Cosinus kąta toru fotonu z osią x	ω'_{i-1} =	0,030
Cosinus kąta toru fotonu z osią y	ω''_{i-1} =	0,053
Cosinus kąta toru fotonu z osią z	ω'''_{i-1} =	0,998

Odcięta punktu rozproszenia	$x_i = -14,5$
Rzędna punktu rozproszenia	$y_i = -3,2$
Wysokość punktu rozproszenia	$z_i = 4,6$
Waga rozproszenia	$w_{i-1} = 1,0000$
Kąt rozproszenia	$\theta_i = 11,5^{\circ}$.

Iloraz wag wprowadzonych do obliczeń może być zastąpiony wzorem:

$$\frac{w_u}{w_{i-1}} = \frac{e^{-\mu_b(\varepsilon_i)/P_uP_i/}}{e^{-\mu_b(\varepsilon_i)/P_kP_i/-\mu_g(\varepsilon_i)/P_uP_k/}} \tag{5}$$

gdzie:

μ_b - liniowy współczynnik oddziaływania dla betonu, cm^{-1},
μ_g - liniowy współczynnik oddziaływania dla powietrza, cm^{-1}.

Punkty P_i, P_k, P_u, odległości pomiędzy którymi wchodzą do wzoru (5) pokazane są na rys. 6.

Wykorzystując wyniki wydrukowane przez maszynę cyfrową oraz wartości

$$\mu_b(\varepsilon_{i-1}) = 0,145\ cm^{-1}, \qquad \mu_b(\varepsilon_i) = 0,151\ cm^{-1},$$

$$\mu_g(\varepsilon_{i-1}) = 0,575.10^{-4}\ cm^{-1}, \qquad \mu_g(\varepsilon_i) = 0,605.10^{-4}\ cm^{-1},$$

stwierdzono, że

$$PP_i = 15,4\ cm, \qquad P_uP_i = 15,9\ cm,$$

czyli droga fotonu po rozproszeniu okazała się większa aniżeli przed rozproszeniem (pomiędzy punktami PP_i). W toku dalszych obliczeń uzyskano zgodnie z wzorem (4)

$$w_{zwarcia} = \frac{0,371}{0,248} = 1,49.$$

Ponieważ $w_{zwarcia} > 1$ więc rozpatrywany foton bierze udział w zjawisku zwarcia model którego opisany został wcześniej.

Obliczenia wagi zwarcia nie zostały zaprogramowane w pracy "Analiza osłabienia promieniowania gamma przy pomocy obliczeń wykonanych metodą Monte-Carlo". Z tego powodu, jak również ze względu na b. ograniczoną łączną ilość analizowanych fotonów, nie jest możliwe statystyczne opracowanie zagadnienia zwarcia promieniowania. Z konieczności trzeba się więc ograniczyć do stwierdzenia występowania fotonów biorących udział w zjawisku.

4. Uwagi końcowe

Zjawisko zwarcia promieniowania w poszczególnych ośrodkach materialnych może występować w różnym stopniu. Do czynników które mają wpływ na zjawisko zwarcia można zaliczyć:

a) geometrię ośrodka,
b) niejednorodność ośrodka,
c) geometrię wiązki,
d) rozkład energii cząstek wiązki promieniowania.

W związku z geometrią ośrodka należy zwrócić uwagę, że zmiana położenia ośrodka materialnego względem przyjętego źródła, jest wystarczająca do wywołania zmian w przebiegu zjawiska zwarcia.

Wpłynęło do Redakcji 2.V.1967 r.

LITERATURA

[1] Auslender S.: A Monte Carlo Study of the Gamma-Ray Energy Flux, Dose Rate and Buildup Factors in Lead-Water Slab Shield, ORNL-2194, Unclassified, 1957.

[2] Fano U., Spencer L.V., Berger M.J.: Perenos gamma-izłuczenija (tłum. z ang.), Gosatomizdat, Moskwa 1963.

[3] Kirn F.S., Kennedy R.J., Wyckoff H.O.: Oblique Attenuation of Gamma-Ray from Cobalt-60 and Cesium-137 in Polyethylene, Concrete and Lead, NBS-2125, Dec. 23, 1952.

[4] Kirn F.S., Kennedy R.J., Wyckoff H.O.; Radiology, 63, 1954.

[5] Peebles G.H.: Rep. RAND, R-240, December 1, 1952.

АНАЛИЗ γ-КВАНТОВ В ЭФФЕКТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Р е з ю м е

В предлагаемой работе приводится эффект короткого замыкания для γ-излучения. Используется численные результаты расчетов ослабления γ-излучения, полученные автором с помощью метода Монте-Карло и дается пример кванта, участвующего в эффекте короткого замыкания.

ANALYSIS OF PHOTON BEHAVIOR IN THE SHORT CIRCUITING

S u m m a r y

In the article the effect of short circuiting is considered. The results of Author's Monte Carlo calculations of the γ-Ray attenuation are taken into consideration and on this basis the example of involved photon is described.