



## Dawki promieniowania jądrowego

Paweł Moskal  
Instytut Fizyki UJ

### I. Przykłady promieniowania jądrowego

Promieniowanie jądrowe są to cząstki wylatujące z jąder atomowych na skutek zachodzących tam przemian. Może to być na przykład elektron, gdy w wyniku oddziaływania słabego, neutron we wnętrzu jądra atomowego zamienia się w proton, elektron i antyneutrino ( $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ ). Takiej przemianie podlega na przykład jądro strontu ( $^{90}\text{Sr}$ ) zmieniając się w itr ( $^{90}\text{Y}$ ). Wskaźnik górny oznacza łączną liczbę protonów i neutronów, w tym przypadku wynosi ona 90. Elektrony wylatujące w wyniku reakcji  $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} + e + \bar{\nu}$  stanowią promieniowanie beta. Promieniowanie beta jest wysyłane także na przykład przez izotopy jodu ( $^{131}\text{I}$ ) i cezu ( $^{137}\text{Cs}$ ). Lecz w tym przypadku oprócz promieniowania beta wysyłane jest także promieniowanie gamma, ponieważ powstałe w wyniku przemiany jądra mają dodatkową energię w stosunku do swojej energii podstawowej. Na przykład  $^{137}\text{Cs}$  zamienia się na wzbudzone jądro baru ( $^{137}\text{Ba}$ ). W tym przypadku wzbudzone jądro  $^{137}\text{Ba}$  przechodzi do stanu podstawowego wysyłając kwant promieniowania elektromagnetycznego o energii 0,66 MeV. Kwanty promieniowania o tak dużej energii (milion razy większej od kwantów światła) nazywane są promieniowaniem gamma. Kwanty gamma są niewidzialne, ale powstają analogicznie jak fotony, przy czym fotony wysyłane są z atomów, gdy elektrony przechodzą z wyższych energetycznie powłok na niższe, a w przypadku jąder przejścia dotyczą protonów i neutronów. **Izotopy  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$  i  $^{137}\text{Cs}$  stanowią najistotniejszy wkład do wzrostu promieniowania w atmosferze w trakcie ewentualnych awarii reaktorów jądrowych.** Innym rodzajem promieniowania jądrowego są cząstki alfa (czyli połączone ze sobą dwa protony i dwa neutrony), które odrywają się od dużych jąder. Cząstki alfa wysyłane są na przykład z jąder radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ), które rozpadają się na jądro polonu i cząstkę alfa ( $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} + \alpha$ ). Radon jest gazem ulatniającym się do atmosfery ze skorupy ziemskiej gdzie powstaje w wyniku rozpadu radu  $^{226}\text{Ra}$ . Jako gaz jest wdychany przez człowieka, a promieniowanie alfa radonu stanowi największy wkład do dawek naturalnego napromieniowania.

### II. Miara szkodliwości napromieniowania

Opis poniższy jest przypomnieniem z artykułu opublikowanego w *Fotonie* 109. Elektron (promień beta) lub jądro helu (promień alfa) przy przechodzeniu przez materię oddziałuje z elektronami za pośrednictwem oddziaływania elektromagnetycznego. Przelatując przez materię elektron odpycha, a cząstka alfa przy-

ciąga do siebie elektrony związane w atomach naświetlanej substancji. W obu przypadkach w wyniku tego oddziaływania elektrony materii przeskakują na wyższe powłoki energetyczne lub są całkowicie odrywane od atomów. W sumie promień beta lub cząstka alfa o energii około 1 MeV może uwolnić kilkadziesiąt tysięcy elektronów. Pośrednio podobne skutki wywołuje promieniowanie gamma. Kwant gamma wpadając do wnętrza materii przekazuje jednemu z elektronów całość lub część swojej energii, a następnie wybity elektron oddziałuje z materią jak promień beta. Zatem miarą napromieniowania może być liczba zjonizowanych atomów lub też energia zdeponowana w materiale. Energię zdeponowaną na jednostkę masy nazywa się **dawką pochłoniętą**, a jej jednostką jest Gy (grej), gdzie  $Gy = J/kg$ .

W organizmach żywych skutki biologiczne napromieniowania zależą nie tylko od zdeponowanej energii, ale także od tego, czy dana energia została zużyta na zjonizowanie małej czy dużej liczby komórek. Ponieważ takie same sumaryczne zniszczenia atomów rozłożone na większą liczbę komórek dają większe szanse, iż komórki się zregenerują lub też, że zmiany będą nieistotne z punktu widzenia ich funkcjonowania. Pod tym względem promieniowanie gamma i beta wywołują takie same skutki biologiczne, a są one znacznie mniejsze niż skutki wywołane przez promieniowanie alfa. Energia cząstek alfa i elektronów wysyłanych w przemianach jądrowych jest rzędu MeV. Cząstki alfa mają około 8000 razy większą masę i dwa razy większy ładunek niż elektrony i dlatego poruszają się znacznie wolniej i szybciej wytracają energię wyhamowując na drodze rzędu kilkudziesięciu mikrometrów (czyli średnio tylko w kilku komórkach). Natomiast cząstki beta o podobnej energii przebywają w organizmie drogę średnio kilku milimetrów, czyli wywołują jonizację w około 100 razy większej liczbie komórek, ale za to jonizacja w każdej z komórek jest około 100 razy mniejsza niż przy przejściu cząstki alfa. Dlatego jeśli chodzi o skutki biologiczne lepszą miarą napromieniowania jest **dawka równoważna**, którą otrzymuje się poprzez przemnożenie dawki pochłoniętej przez odpowiedni współczynnik szkodliwości charakteryzujący rodzaj promieniowania. Okazuje się, że szkody biologiczne powodowane przez cząstki alfa są dwadzieścia razy większe niż przez cząstki beta czy kwanty gamma. Dlatego współczynnik ten wynosi 1 dla promieniowania beta i gamma oraz 20 dla promieniowania alfa. Choć fizyczną jednostką dawki równoważnej jest J/kg, tak samo jak dawki pochłoniętej, to dla odróżnienia charakteru biologicznego dawki równoważnej jej jednostką nie jest Gy lecz Sv (siwert). Nazwa pochodzi od nazwiska pioniera ochrony radiologicznej dr. Rolf Sieverta.

Molekuły istotne dla życia komórek mogą być uszkodzane zarówno na skutek bezpośredniego zrywania wiązań pomiędzy stanowiącymi je atomami jak również na skutek jonizacji molekuł z otoczenia, z którymi następnie wchodzi w reakcje chemiczne. Na przykład molekuły DNA mogą ulegać utlenieniu rodnikami OH, które powstają w ciągu reakcji chemicznych w wy-

niku jonizacji cząsteczek wody. W ogólności im większe molekuly tym większa jest szansa ich uszkodzenia przy zadanej dawce napromieniowania. Ze względu na różne właściwości biologiczne różne komórki będą różnie reagować na taką samą dawkę promieniowania. Dlatego przy określaniu skutków napromieniowania należy także uwzględnić wrażliwość poszczególnych narządów czy tkanek. I tak na przykład wrażliwość gruczołów płciowych na promieniowanie jest 2 razy większa niż szpiku kostnego i aż 20 razy większa niż skóry czy powierzchni kości. Po uwzględnieniu wrażliwości otrzymujemy **dawkę skuteczną**, którą podajemy także w Siwertach.

Podobnie jak w przypadku innych zatruc ostateczne skutki dla organizmu zależą w dużej mierze od wydolności systemu immunologicznego. Dlatego nie można określić jednoznacznie jednorazowej dawki śmiertelnej. Określa się natomiast dawkę, po której otrzymaniu połowa populacji umiera w ciągu 30 dni. W przypadku człowieka jest to około 3,5 Sv. Siwert jest miarą zatrucia organizmu promieniowaniem jądrowym tak jak promile są miarą zatrucia alkoholem. Łatwo jest zapamiętać skalę, ponieważ podobnie jak w przypadku alkoholu dawka śmiertelna to z grubsza 4 – czy to promile czy też Siwerty.

### III. Dawki otrzymywane w środowisku naturalnym

Działaniu promieniowania jądrowego poddawani jesteśmy nieustannie przez całe życie. Pochodzi ono z naturalnych radionuklidów znajdujących się w skorupie ziemskiej, z promieniowania kosmicznego oraz z izotopów promieniotwórczych wytwarzanych w atmosferze w wyniku reakcji jądrowych wywołanych przez promieniowanie kosmiczne. Promieniowanie jądrowe nasświetla nas także od wewnątrz w wyniku rozpadu radionuklidów wchłanianych drogą pokarmową i oddechową. Największy wkład do otrzymywanej przez nas dawki ma promieniowanie radonu  $^{222}\text{Rn}$ . Radon jako gaz wydostaje się na powierzchnię Ziemi i jest przez nas wdychany. W ciągu roku otrzymujemy z tego powodu dawkę w wysokości około 1,3 mSv. Radon może gromadzić się w zamkniętych pomieszczeniach powodując, że w istocie największe dawki otrzymujemy w domu. Stężenia radonu w domach mogą istotnie się różnić i często zdarza się, że dawka od radonu wynosi nawet kilkanaście mSv na rok. Ponadto większe stężenie radonu i produktów jego rozpadu może występować także w wielu kopalniach. Według danych z 1999 roku w Polsce ponad 4% górników w kopalniach rud metali i węgla brunatnego otrzymało roczne dawki powyżej 5 mSv.

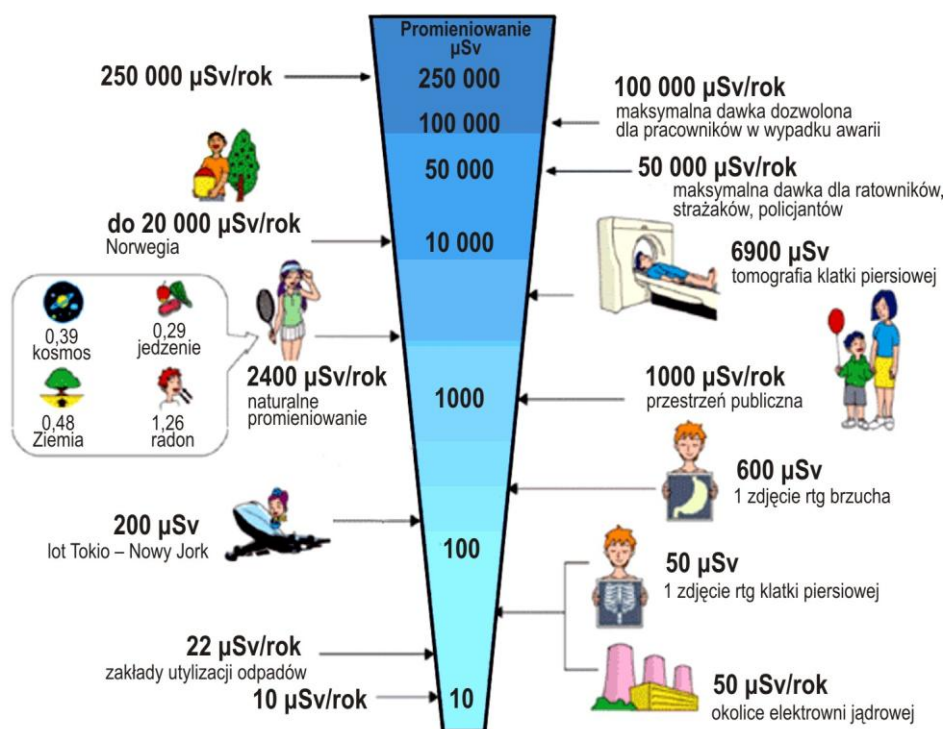
Rocznie w wyniku promieniowania kosmicznego otrzymujemy dawkę około 0,3 mSv, a wewnętrzne napromieniowanie z powodu zawartości w ciele potasu  $^{40}\text{K}$  wynosi około 0,2 mSv. Ze względu na promieniowanie kosmiczne podwyższenie dawki następuje także wraz z wysokością. Dlatego na przykład 10-godzinny lot samolotem na wysokości 11 kilometrów powoduje dodatkową dawkę wynoszącą około 0,02 mSv. Łącznie średnia dawka w Polsce w wyniku natu-

ralnego napromieniowania wynosi około 2,3 mSv, co w ciągu całego życia daje około 200 mSv. Ale ponad 5% ludzkości żyje na terenach o wielokrotnie podwyższonej zawartości pierwiastków promieniotwórczych. Takie obszary rozrzucone są po Azji, Europie, Afryce i Ameryce. Na przykład w Norwegii naturalne promieniowanie wynosi w niektórych miejscach nawet 20 mSv na rok, a w Indiach w prowincji Kerala ze względu na złoża zawierające cer i lantan mieszkańcy otrzymują dawki kilkadziesiąt razy wyższe niż w Polsce. Można znaleźć nawet takie obszary, jak na przykład w mieście Ramsar w Iranie, gdzie lokalne dawki są 1000 razy większe niż przeciętnie ze względu na źródła wody zawierającej duże stężenie radu.

#### **IV. Dawki w wyniku diagnostyki medycznej**

Dodatkowo wiele osób jest napromieniowywanych za pomocą promieniowania rentgenowskiego lub w wyniku zastosowania izotopów promieniotwórczych w nowoczesnej diagnostyce medycznej. Podczas wykonywania zdjęć rentgenowskich otrzymujemy dawki w zakresie od 0,1 do kilku mSv. Na przykład zdjęcie klatki piersiowej powoduje dawkę około 0,1 mSv, a zdjęcia kręgosłupa czy prześwietlenia płuc wywołują dawki około 4 mSv. Większe dawki pacjenci otrzymują w badaniach wymagających podawania preparatów promieniotwórczych. W wysoko rozwiniętych krajach powszechnie stosuje się Pozytonową Tomografię Emisyjną. Jest to najbardziej skuteczna metoda diagnozowania nowotworów. Niestety, ze względu na wysokie koszty w Polsce działa dopiero kilka takich tomografów. Metoda ta bazuje na podawaniu pacjentowi cukru zawierającego promieniotwórczy fluor  $^{18}\text{F}$ . W trakcie badania, na kilka godzin, pacjent stanowi źródło promieniotwórcze emitujące około 200 000 000 promieni gamma na sekundę, otrzymując dawkę około 10 mSv. Czyli kilka razy więcej niż średnia dawka roczna na terenie Polski, ale jednocześnie kilka razy mniej niż dawki roczne na obszarach o podwyższonej radioaktywności. Podobne dawki, otrzymujemy w trakcie tomografii komputerowej, powszechnie stosowanej także w Polsce. Mieszkaniec Polski z powodu diagnostyki medycznej otrzymuje średnio dawkę w wysokości 0,85 mSv.

### Przyjmowane dawki promieniowania jonizującego w życiu codziennym



Sv (sievert) = równoważna dawka napromieniowania

$\mu\text{Sv} = 10^{-6} \text{ Sv}$ ;  $\text{mSv} = 10^{-3} \text{ Sv}$

Ilustracja wykonana na podstawie [http://asset.soup.io/asset/1680/9547\\_8c75.gif](http://asset.soup.io/asset/1680/9547_8c75.gif)

### V. Przypomnienie efektu hormezy radiacyjnej

Nasze komórki są cały czas uszkodzane głównie na skutek reakcji chemicznych wywoływanych w organizmie przez wolne rodniki. Szacuje się, że w wyniku przemian metabolicznych w organizmie człowieka powstaje około  $10^9$  uszkodzeń na dzień, a układ immunologiczny musi sobie na bieżąco z nimi radzić. Warto podkreślić, że uszkodzenia wywoływane na skutek jonizacji naturalnym napromieniowaniem w dawkach około 3 mSv w ciągu roku są ponad  $10^5$  razy mniejsze. Jak niedawno opisaliśmy w *Fotonie* 110, okazuje się że promieniowanie jonizujące w małych dawkach pozytywnie pobudza układ immunologiczny. Potwierdza to wiele doświadczeń wykonywanych na zwierzętach oraz obserwacja napromieniowanych ludzi. Na przykład systematyczne zestawienie danych z terapii pacjentek leczonych na gruźlicę za pomocą promieniowania jądrowego wykazało, że dla dawek rzędu 100 do 200 mSv szanse zachorowania

na raka znacznie maleją. Zmniejszona śmiertelność i prawdopodobieństwo zachorowania na białaczkę została stwierdzona także wśród tych mieszkańców Hiroszimy i Nagasaki, którzy zostali napromieniowani dawkami w zakresie do 200 mSv. Z jednej strony wraz ze wzrostem dawki napromieniowania wzrasta liczba uszkodzeń DNA, ale z drugiej strony promieniowanie pobudza pozytywnie układ immunologiczny i w efekcie wpływ na organizm jest korzystny w zakresie dawek do 200 mSv. Należy zauważyć, że 200 mSv jest dawką prawie 100 razy przekraczającą średnią roczną dawkę promieniowania otrzymywaną przez ludzi na terenie Polski. W obliczu powyższych faktów nie ma powodów do wpadania w panikę jeśli, tak jak niedawno w Tokio, poziom promieniowania w ciągu tygodnia podniesie się 10 czy nawet 100 razy.

### Literatura

- [1] A. Hrynkiewicz, *Dawki i działanie biologiczne promieniowania jonizującego*, Państwowa Agencja Atomistyki (1993).
- [2] A. Hrynkiewicz, *Promieniotwórczość naturalna w środowisku*, „Postępy Fizyki”, t. 44, z. 5, 439 (1993).
- [3] Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki, 2(42)/2000.
- [4] Z. Jaworski, *Dobroczynne promieniowanie*, „Wiedza i Życie”, 3/1997, 20–29.
- [5] L. Dobrzyński, *Hormeza – Zjawiska powszechnie znane i nieznanne*, <http://www.ipj.gov.pl/pl/szkolenia/matedu/hormeza.htm>.
- [6] K.W. Fornalski, L. Dobrzyński, *Pracownicy przemysłu jądrowego a promieniowanie jonizujące*, PTJ, vol. 52, z. 2, 29 (2009).