

IV. PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ ŚRODOWISKA

4.1 Uwagi ogólne

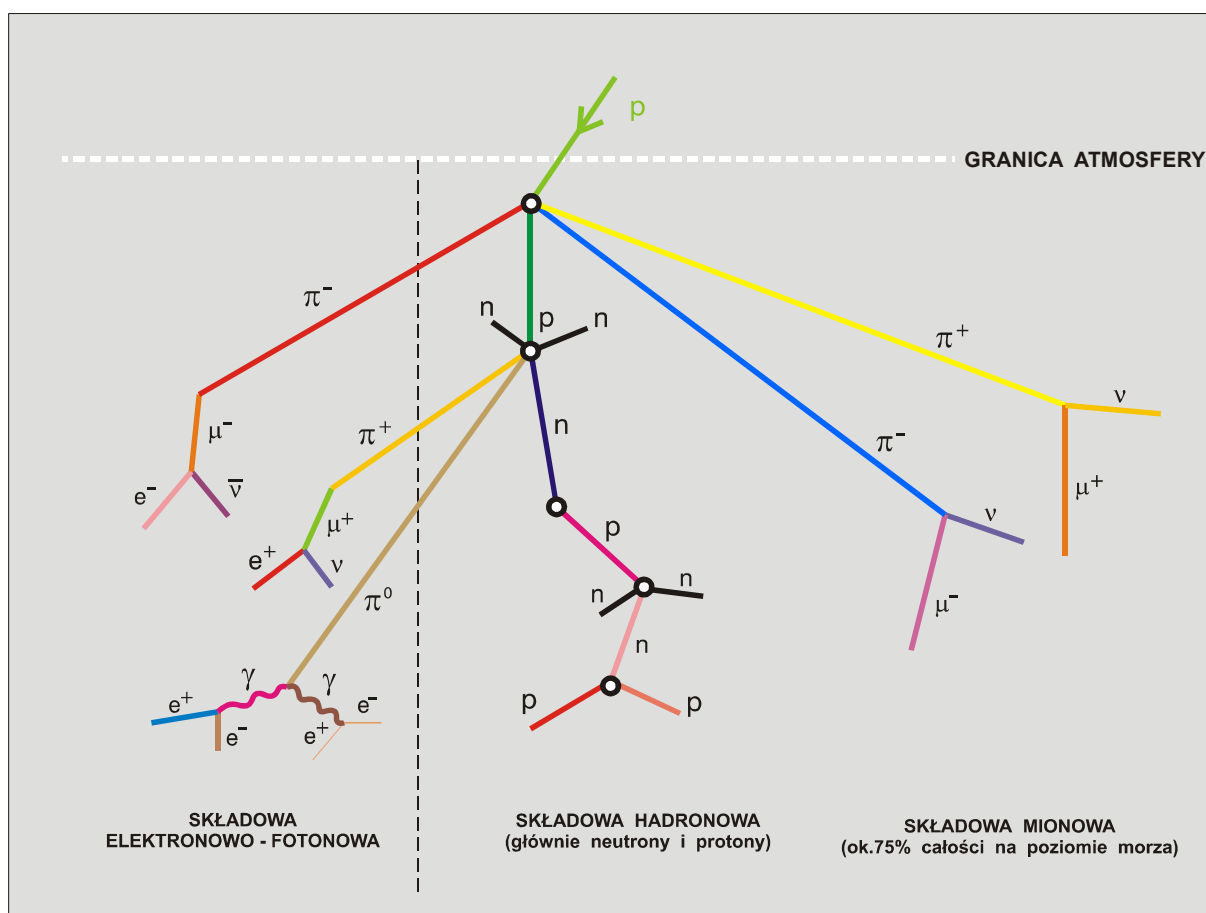
Rozwojowi naszego Wszechświata, a więc i Ziemi i organizmów na niej towarzyszyło zawsze promieniowanie elektromagnetyczne i korpuskularne; było i jest ono nierozdzielalną częścią tego rozwoju. Z Kosmosu dochodzi do nas oprócz światła widzanego promieniowanie w zakresie niskich energii (mikrofale, podczerwień), nadfiolet, dochodzi do nas także promieniowanie korpuskularne, złożone z cząstek subatomowych, których prędkości potrafią osiągać 200 000 km/s: 5 okrążeń Ziemi wokół równika w czasie jednej sekundy! Składnikami promieniowania jądrowego są w Kosmosie protony, miony, piony, cząstki alfa, elektrony i pozytony oraz fotony: promieniowanie X i γ (rys.21). Biorąc pod uwagę inne naturalne źródła promieniowania w naszym otoczeniu (powiemy o nich za chwilę) można obliczyć, że w każdej sekundzie przenika przez nas około 15000 cząstek jonizujących. Samo promieniowanie z izotopu ^{40}K znajdującego się w naszym ciele, to 340 milionów (!) cząstek beta na dobę. Teoretycznie, każdy akt jonizacji w obrębie naszych komórek może doprowadzić do zainicjowania nowotworu lub chorób genetycznych. Podczas niektórych wielokrotnych prześwietleń, w procedurze fluoroskopii czy tomografii komputerowej, przenika przez nasze płuca aż 100 miliardów fotonów. Jak widać, choć teoretycznie każda cząstka promieniowania jonizującego może być groźna, szansa na to, aby się taką stała jest bardzo niewielka: jeśli nawet wystąpi uszkodzenie w obrębie komórki, może być ono zreperowane dzięki naturalnym siłom obronnym organizmu. Jak się ocenia, prawdopodobieństwo, iż dana cząstka, czy kwant gamma (foton) wywoła zmiany nowotworowe lub genetyczne wynosi jeden do $30 \cdot 10^{12}$. W skali całej ludności Ziemi oznacza to zgon ok. 1.5% ogółu ludności rocznie. Choroby nowotworowe jednak, na które umiera ok. 20% ludzi, dalece nie są jedynymi, prowadzącymi do zgonu (np. na choroby serca umiera większy procent ludzi).

Oprócz naturalnych źródeł, do których obok promieniowania z Kosmosu zaliczamy promieniowanie pochodzące z nuklidów promieniotwórczych znajdujących się w skałach i glebie (np. uran-235 i 238, tor-232, wreszcie potas-40), w samym człowieku znajdują się pewne ilości jąder promieniotwórczych, jak wspomniany już ^{40}K . Dodatkowo produkujemy źródła sztuczne, z których najbardziej znanymi są trzy: bomby jądrowe, reaktory jądrowe i

źródła do terapii, w tym akceleratory medyczne. Choć takie źródła wnoszą wkład do ogólnego bilansu poziomu promieniowania, łatwo pokazać, że jest to wkład stosunkowo niewielki, jeśli porówna się go z poziomem tła, tj. promieniowaniem nas otaczającym, które ewidentnie nie powoduje znaczących szkód.

4.2 Promieniowanie naturalne wokół nas

Jak mówiliśmy, pierwszym źródłem promieniowania jonizującego jest Kosmos. W zewnętrznych warstwach atmosfery napotykamy całe widmo promieniowania elektromagnetycznego: od widzialnego do wysokoenergetycznych kwantów gamma, a także intensywne, wysokoenergetyczne promieniowanie korpuskularne.



Rys. 4.1 Promieniowanie kosmiczne i jego składowe

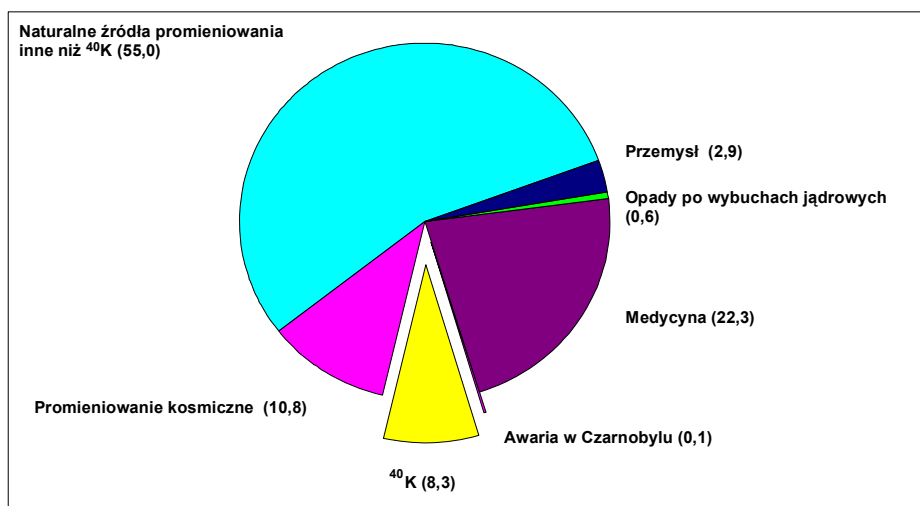
Wyniki pomiarów wskazują, iż na półkuli północnej Ziemi i szerokości geograficznej powyżej 55° przez każdy centymetr kwadratowy przechodzi w ciągu godziny¹ ok. 4500 protonów, 600 cząstek α , 30 jonów C, N i O, 8 atomów Mg, 3 wapnia i 1 żelaza. Wielkie energie cząstek promieniowania kosmicznego (od ok. 100 MeV do 10^{20} eV) są na szczęście znacznie wytracane w procesach zderzeń cząstek z jądrami i atomami atmosfery otaczającej Ziemię. W wyniku zderzeń wysokoenergetycznych protonów z jądrami dominujących w atmosferze ziemskiej atomów tlenu, czy azotu, powstają neutrony, protony, piony (zarówno obojętne π^0 , jak i naładowane π^+ i π^-), kaony i inne cząstki elementarne. Wysokoenergetyczne fotony (promienie gamma) mogą w obecności innych jąder przemienić się w parę elektron i pozyton (elektron dodatnio naładowany), piony rozpaść się na miony i neutrino, miony również nie są cząstkami trwałymi.

Jak wspominaliśmy, skorupa ziemska zawiera sporo jąder (nuklidów) promieniotwórczych, z których główne można zebrać w cztery **szeregi (rodziny) promieniotwórcze**: uranowo-radowy, uranowo-aktynowy, toru i neptunu. Utworzone kilka miliardów lat temu aktywne (promieniotwórcze) jądra jak ^{144}Nd czy ^{235}U przetrwały do dziś. Najczęściej spotykanymi pierwiastkami promieniotwórczymi w skałach są ^{40}K , ^{87}Rb oraz produkty rozpadów promieniotwórczych ^{238}U i ^{232}Th . Spośród długożyciowych pierwiastków, zasadniczy wkład do promieniotwórczości naturalnej Ziemi wnoszą ^{235}U i ^{238}U , ^{226}Ra i ^{228}Ra oraz ^{210}Pb . Te trzy ostatnie nuklidy są wchłaniane przez rośliny i poprzez łańcuch pokarmowy dostają się też do człowieka, podobnie jak inny popularny izotop promieniotwórczy ^{40}K . Wchłanianymi przez człowieka są również ^{137}Cs i ^{90}Sr , które, jako produkty reakcji rozszczepienia uranu, mogą być rozpraszane w środowisku po wybuchach jądrowych oraz w wyniku awarii reaktorów, takich jak np. pożar elektrowni czarnobylskiej. Zarówno promieniotwórczy cez, gromadzący się w tkankach miękkich, jak i promieniotwórczy stront, gromadzący się w kościach, mogą być groźne dla organizmu ludzkiego.

Wspomniane wyżej jądra uranu, jak i toru przechodzą długi cykl rozpadów promieniotwórczych. Np. izotop uranu, ^{238}U , ośmiokrotnie rozpada się na drodze rozpadu α i sześciokrotnie na drodze rozpadu β zanim stanie się stabilnym izotopem ^{206}Pb , a ^{232}Th przechodzi sześć rozpadów typu α i cztery typu β nim przekształci się w stabilny ^{208}Pb . W obu tych łańcuchach rozpadu tworzą się izotopy gazu szlachetnego – radonu, które -

¹ Wanda Leyko w „Biofizyka dla biologów”, pod red. M.Bryszewskiej i W.Leyko, PWN, Warszawa (1997), str. 418

dyfundując poprzez glebę i szczeliny skalne - wydostają się na zewnątrz złoża i mieszają się z powietrzem, którym oddychamy. Ze względu na czasy życia izotopów radonu, w zasadzie tylko jeden z nich, ^{222}Rn , (o półokresie rozpadu 3,8 dnia), wnosi istotny wkład do dawki pochodzącej od źródeł naturalnych. Chociaż radon jest słabo rozpuszczalny w wodzie, a więc morza i oceany zawierają go stosunkowo niewiele, przy wypompowywaniu wody z głębokich podkładów łatwo może się zdarzyć, że wiele tego gazu wydostanie się na zewnątrz. Być może więc ciesząc się kąpielą pod prysznicem (w domku z indywidualnym ujęciem wody) właśnie w tym momencie znajdujemy się pod zwiększonym wpływem promieniotwórczego radonu. W niektórych oszacowaniach podaje się, że 6-12% wszystkich przypadków zachorowań na raka płuc pochodzi właśnie z działania radonu, przy czym groźny jest nie tyle sam gaz, lecz produkty jego rozpadu, jakimi są jony polonu, bizmutu czy ołowiu. Te, będąc elektrycznie naładowanymi, przyczepiają się do cząsteczek kurzu, są wdychane przez nas i osadzają się w płucach. Będąc tam i rozpadając się dalej, wysyłają do tkanki płucnej i w jej okolicy jonizujące tkankę produkty rozpadu. W ocenie dawek pochodzących od różnych źródeł promieniowania jonizującego szacuje się, że udział pochodzący od radonu wynosi ok. 55% średniej dawki (w Polsce jest to ~ 3.4 mSv/rok) otrzymywanej przez człowieka. Rozkład dawki, otrzymywanej przez mieszkańca Polski, na poszczególne składowe pokazuje rys.4.2 oraz Tabela 4.1.



Rys. 4.2 Rozkład dawki w Polsce na poszczególne składowe (%)

Łączna średnia radioaktywność każdego kilometra kwadratowego skorupy ziemskiej może być oceniana na 1 Ci, tj. $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq. Przekładając aktywność na język dawek

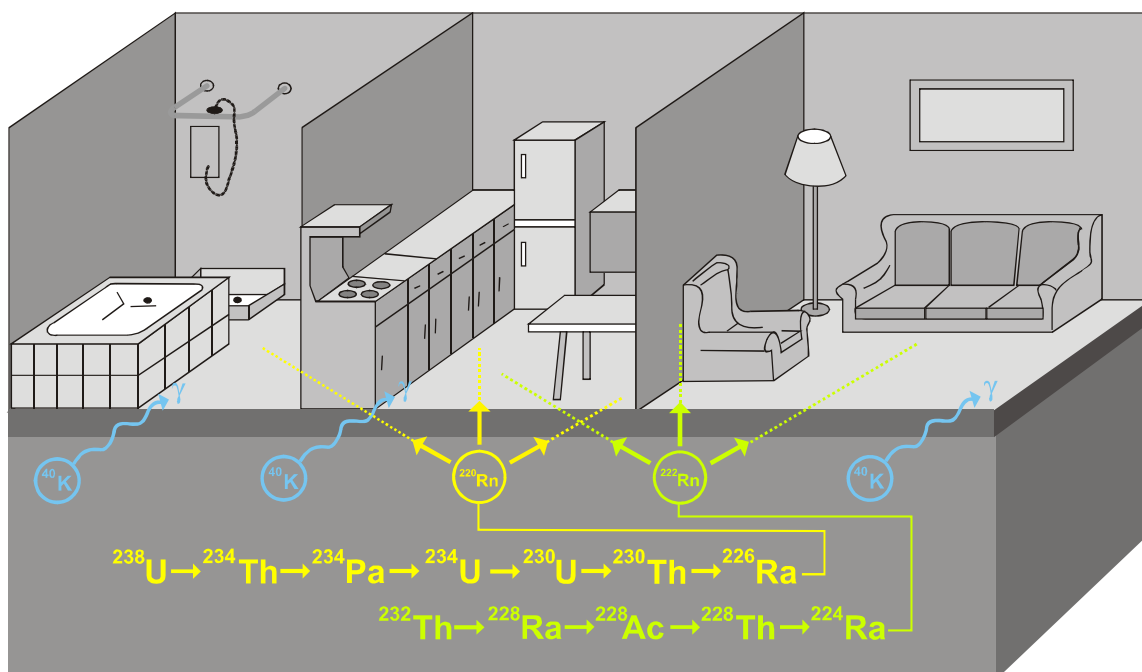
promieniowania, które mierzymy w siwertach², średnia dawka roczna przypadająca na mieszkańca wynosi ok. 2,5 mSv, przy czym średnia dawka pochodząca od promieniowania skorupy ziemskiej wynosi na ogół 0,3 do 0,6 mSv rocznie. Na świecie można znaleźć jednak wiele obszarów, w których poziom promieniowania jest znacznie wyższy i może wynosić aż kilkaset milisiwertów rocznie. Nie stwierdzono dotąd, aby osoby zamieszkujące na obszarach o tak znacznie podwyższonym poziomie promieniowania wykazywały większą niż inni skłonność do zachorowań na choroby nowotworowe, czy też, aby częstotliwość mutacji komórek była tam większa niż gdzie indziej.

Otrzymywana dawka promieniowania zależy silnie od wysokości: na poziomie morza moc dawki wynosi ok. 0,03 $\mu\text{Sv/godz}$, na poziomie 2000 m. wynosi już 0,1 $\mu\text{Sv/godz}$ (czyli ok. 0,88 mSv/rok), na poziomie 12 km – 5 $\mu\text{Sv/godz}$, a na wysokości 20 km nad poziomem morza aż 13 $\mu\text{Sv/godz}$.

Ślady pierwiastków promieniotwórczych znajdują się w węglu, w dymie i popiele, pochodzących ze spalania węgla. Produkty spalania, typowe dla konwencjonalnych elektrowni węglowych osadzają się w glebie, przenikają do roślin i wreszcie trafiają do przewodów pokarmowych zwierząt i ludzi. Energia pochodząca ze źródeł geotermalnych też nie jest wolna od problemu promieniotwórczości, bowiem w wodzie z tych źródeł znajduje się dość pokaźna domieszka nuklidów promieniotwórczych. Powszechnie stosowane nawozy fosforowe (fosfatowe), do wytwarzania których używane są odpowiednie skały, zawierają spore domieszki pierwiastków z szeregu uranowego. W procesach wydobywania rud uranowych, ale nie tylko tych, górnicy narażeni są także na podwyższone stężenia promieniotwórczego radonu. Typowe aktywności powietrza wynikające ze stałej obecności radonu w środowisku (rys. 4.3) podane są w Tabeli 4.2³

² Wielkość dawki odpowiadającej pochłonięciu przez kilogram ciała promieniowania o energii 1 dżula, z uwzględnieniem stopnia biologicznej szkodliwości danego rodzaju promieniowania. Pojęciu dawki jest poświęcony następny rozdział.

³ G.Marx, w „Atoms in our hands”, Roland Eötvös Physical Society, Budapest (1995), str. 51



rys. 4.3 Gazowy radon (dwa izotopy! Okresy połowicznego zaniku ^{222}Rn i ^{226}Rn wynoszą odpowiednio 3,8 dnia oraz 55 s) jest stale obecny w naszych pomieszczeniach. Znaczny wkład do dawki wnosi też promieniotwórczy ^{40}K .

Spośród nuklidów promieniotwórczych znajdujących się w naszych ciałach należy wymienić przede wszystkim następujące: ^{14}C i tryt, ^3H , które znalazły się tam wskutek działania promieniowania kosmicznego, potas ^{40}K , wchłaniany przez nas z naturalnym potasem, oraz ^{87}Rb . Spożywając ryby morskie i tzw. owoce morza, zawierające pewne ilości ^{210}Pb i ^{210}Po , do naszych organizmów dostają się i te dwa izotopy promieniotwórcze. Mięso niektórych zwierząt zawiera także pewne ilości pierwiastków promieniotwórczych, jak ^{210}Po u renów, czy uran u kangurów i owiec w Australii. Z wymienionych tu nuklidów najważniejszym jest potas-40 o nadzwyczaj długim półokresie rozpadu, aż 1,3 miliarda lat. Choć ten radionuklid pojawia się w naturalnym potasie w minimalnych ilościach, zaledwie 117 atomów na każdy milion atomów naturalnego potasu, wystarcza to, aby w ciele osobnika o wadze 70 kg następowało około 4000 przemian beta na sekundę. Oprócz łatwo przyswajalnego potasu, nasz organizm przyswaja uran, stront, rad i tor, spośród których ^{226}Ra , obecny zarówno w glebie jak i wodzie, prowadzi do największej liczby rozpadów promieniotwórczych w naszych organizmach. Dzieje się tak dlatego, że pierwiastek ten jest podobny chemicznie do wapnia i baru, które są szczególnie łatwo wchłaniane.

Tabela 4.1 Średnia dawka dla Polski w 1996 roku w/g źródeł CLOR

Źródła promieniowania	Dawka [mSv]	Procent dawki [%]
Naturalne źródła promieniowania:		
Radon z szeregów U	1,420	40,5
Radon z szeregu Th	0,080	2,3
Gleby i skały: potas ^{40}K	0,120	3,4
szereg uranowy U	0,130	3,7
szereg torowy Th	0,210	6,0
Ciało ludzkie:		
potas ^{40}K	0,170	4,85
szereg uranowy U	0,055	1,57
szereg torowy Th	0,007	0,20
Inne	0,015	0,43
Pierwotne promieniowanie kosmiczne	0,380	10,84
Izotopy wytworzone przez promieniowanie kosmiczne	0,010	0,29
Źródła wytworzone przez człowieka :		
Badania radiologiczne	0,700	20,00
Medycyna jądrowa	0,080	2,30
Wyroby przemysłowe	0,100	2,90
Odpady promieniotwórcze	0,020	0,6
Awaria w Czarnobylu	0,005	0,14
Energetyka jądrowa	0,002	0,06
RAZEM	3,504	100,00

Tabela 4.2 Aktywności radonu w naszym otoczeniu

Miejsce pomiaru	Aktywność [Bq/m³]
Powietrze przy gruncie	10
Wietrzony pokój	40
Pokój zamknięty	80
Piwnica	400
Pieczara	10000
Odwierty o wysokiej aktywności	100000

Szczególnym radionuklidem napromieniowującym nas od wewnątrz jest węgiel ^{14}C , pochodzenia kosmicznego, mający półokres rozpadu 5730 lat. Tworzy się on w wyniku reakcji jądrowych protonów z jądrami azotu i jest łatwo wchłaniany przez organizmy żywe. Gdy organizm umiera, wchłanianie tego węgla ustaje. Typowy dorosły ma w sobie tyle ^{14}C , że zachodzą w nim około 4000 rozpadów beta na sekundę, podobnie jak w przypadku potasu. Różnicę między promieniowaniem tych dwóch radionuklidów określa jednak energia promieniowania, która w przypadku przemiany β izotopu ^{14}C wynosi 155 keV (wtedy średnia energia promieniowania β wynosi 49,5 keV), podczas gdy przemianom β izotopu ^{40}K towarzyszy promieniowanie β o średniej⁴ energii 455 keV lub promieniowanie γ o energii 1,46 MeV, opuszczające nasze ciało (towarzyszy ono procesowi wychwytu elektronu). Izotopy ^3H , ^{14}C i ^{87}Rb wysyłają miękkie promieniowanie beta, o średniej energii <100 keV, łatwo pochłaniane wewnątrz ciała człowieka, patrz Tabela 4.3. Rozkład dawek promieniowania, na które był narażony przeciętny mieszkaniec Polski w roku 1999 pokazuje rys. 4.4.

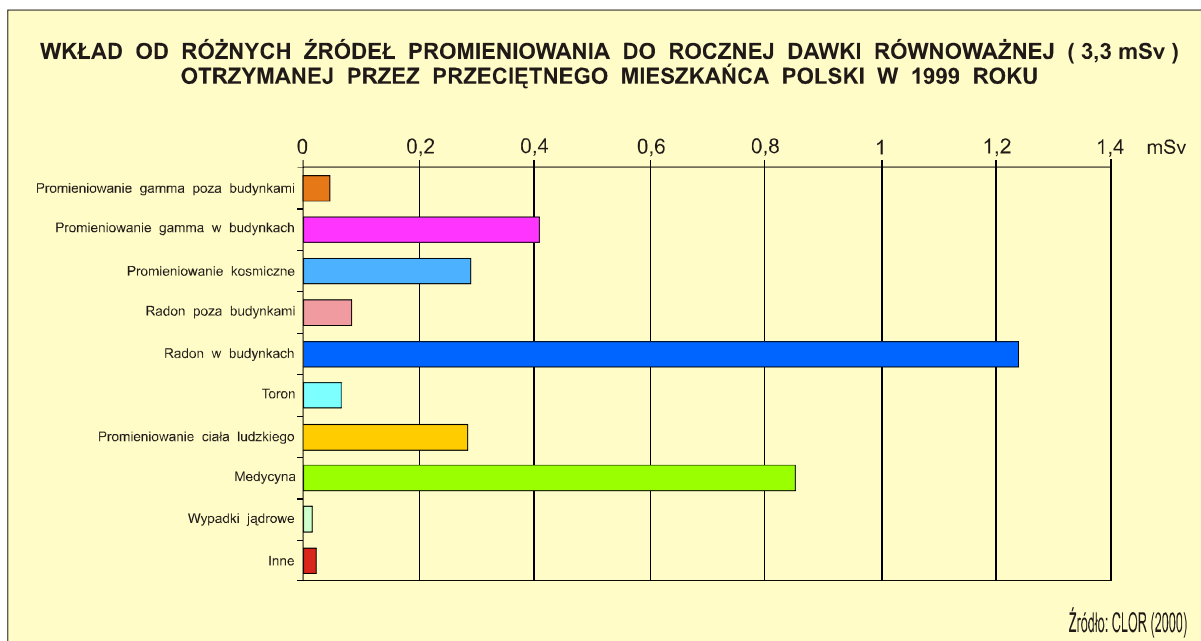
Tabela 4.3 Nuklidy promieniotwórcze zawarte w ciele ludzkim [dane dla tzw. "umownego człowieka"*] oraz podstawowe charakterystyki emitowanego promieniowania

Izotop	Liczba atomów	Liczba rozpadów [Bq]	Przemiana	Energia rozpadu [keV]	Energia średnia $\langle E_\beta \rangle$ [keV]	Orientacyjny zasięg w tkance dla $\langle E_\beta \rangle$ [μm]
^3H	$4,2 \times 10^{10}$	75	β	19	5,7	0,5
^{14}C	7×10^{14}	2690	β	156	49,5	39
^{40}K	$2,5 \times 10^{20}$	4340	β	β 1312 γ 1461	455	1600
^{87}Rb	$1,4 \times 10^{21}$	625	β	274	82	95

*dla celów naukowych i statystycznych wymyślony został tak zwany "umowny człowiek" – ang. "reference man" – waga 70 kg, wzrost 175 cm, pracujący 40 godz. / tydzień, dieta :

⁴ Przypominamy, że proces rozpadu β jest procesem trzyciałowym, w którym oprócz cząstki β występuje też neutrino. W związku z tym należy odróżniać całkowitą energię przemiany od energii emitowanej cząstki β .

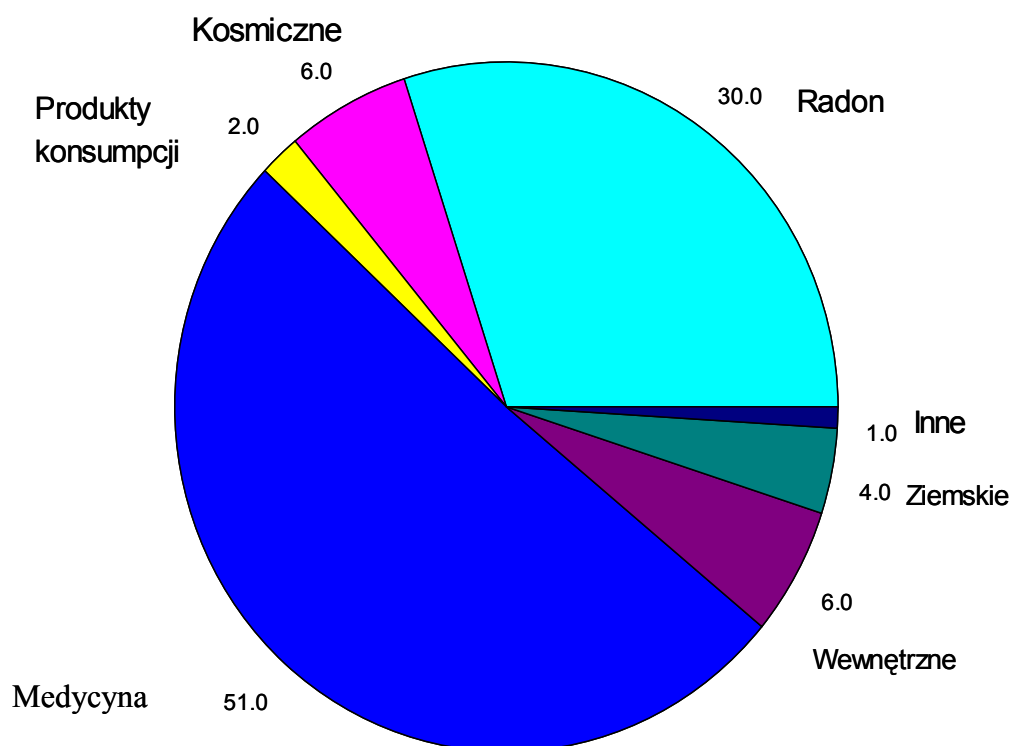
ok. 1,5 kg suchej żywności + 1,2 litra płynów, oddychanie: 20 m³ powietrza na dobę przy umiarkowanym wysiłku fizycznym



rys. 4.4 Rozkład rocznej dawki otrzymywanej przez przeciętnego Polaka w roku 1999

Na koniec warto wspomnieć, że w krajach o wysokim stopniu uprzemysłowienia coraz większą rolę odgrywają procedury medyczne z użyciem promieniowania jonizującego. I tak w roku 2006 rozkład dawki w USA kształtował się odmiennie od tego, który widzimy w Polsce. Zauważmy, że dawka od procedur medycznych w USA osiągnęła już poziom pozostałej dawki promieniowania naturalnego, rys.4.5. Bez względu jednak na proporcje dawki od procedur medycznych warto mieć na uwadze, że życie na Ziemi rozwijało się w polu znacznie wyższego poziomu promieniowania jonizującego niż obecnie, co zupełnie nie przeszkodziło w rozwoju licznych gatunków roślin i zwierząt, w tym ludzi. Ponadto, jak powiemy jeszcze dalej, na Ziemi mamy dość zróżnicowany rozkład dawek promieniowania naturalnego, jednak nie odbija się to w żaden wyraźny sposób na rozwoju populacji zamieszkujących tereny nawet o silnie podwyższonym poziomie promieniowania jonizującego.

Wkład do dawki rocznej (6,27 mSv) w USA, rok 2006



Rys. 4.5 Wkład od dawki rocznej w USA (dane za rok 2006)