



Energia jądrowa w kuchni: konserwowanie żywności za pomocą promie- niowania jądrowego

*Paweł Moskał
Instytut Fizyki UJ*

Artykuł dotyczy tematyki związanej z napromieniowywaniem żywności, wzbudzającej sporo obaw u konsumentów. Narosło wokół tego problemu wiele mitów, które w poniższym artykule zostaną wyjaśnione. Przedstawiono następujące zagadnienia:

- I. Wstęp: Promieniowanie jądrowe.
- II. Skutki biologiczne napromieniowania. Metoda sterylnych owadów.
- III. Konserwowanie żywności promieniowaniem jądrowym.
- IV. Jak sprawdzić czy żywność została napromieniowana.

I. Wstęp: Promieniowanie jądrowe

Promieniowanie jądrowe to rezultat przemian zachodzących w jądrach atomowych na skutek oddziaływań: silnego, słabego i elektromagnetycznego, i jest nazywane odpowiednio promieniowaniem α , β i γ .

Promieniowanie α stanowią jądra helu (czyli dwa protony i dwa neutrony), które za pośrednictwem oddziaływania silnego złączyły się wewnątrz większego jądra i zdołały oderwać się od niego jako całość.

Promieniowanie β wywoływane jest przez oddziaływanie słabe i stanowią go elektrony lub pozytony (antyelektrony), które powstały w wyniku przemiany protonu w neutron, pozyton i neutrino, lub przemiany neutronu w proton, elektron i antyneutrino.

Trzeci rodzaj promieniowania, czyli promieniowanie γ , powstaje analogicznie jak światło widzialne („promieniowanie atomowe”) będące kwantem energii emitowanym przy przejściu elektronu z powłoki o wyższej energii na powłokę o niższej energii. Jądro, podobnie jak atom, jest układem złożonym. Składa się z nukleonów, które mogą znajdować się na różnych powłokach energetycznych, a przejściu ze stanu o wyższej energii do niższej towarzyszy emisja kwantu γ , czyli kwantu promieniowania elektromagnetycznego różniącego się od widzialnych fotonów jedynie energią. Energie przejść jądrowych są miliony razy większe od energii przejść pomiędzy powłokami atomowymi. Dlatego energią charakterystyczną dla promieniowania jądrowego, zarówno α , β jak i γ , jest megaelektronowolt (MeV^1).

II. Skutki biologiczne napromieniowania

Promieniowanie jądrowe α , β i γ oddziałuje z materią głównie za pośrednictwem oddziaływania elektromagnetycznego. Elektron (promieniowanie β) lub

¹ $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \approx 1,602\,177\,33 \times 10^{-13} \text{ J}$.

jądro helu (promieniowanie α) o energii kilku MeV przechodząc przez materię może przenieść na wyższe powłoki elektronowe lub całkowicie oderwać od atomów łącznie około kilkadziesiąt tysięcy elektronów.

Podobne skutki wywołuje promieniowanie γ . Kwant γ wpadając do wnętrza materii, przekazuje jednemu z elektronów całość lub część swojej energii. Następnie wybity elektron o energii rzędu MeV zachowuje się jak promieniowanie β .

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 $\text{Gy} = \text{J/kg}$. 1 J odpowiada około $6 \cdot 10^{18}$ eV. Biorąc pod uwagę, że energia wiązania elektronów w atomach jest rzędu 30 eV, dawka 1 Gy powstaje na skutek wybitcia około $2 \cdot 10^{17}$ elektronów w jednym kilogramie. Jest to liczba niewyobrażalnie duża, lecz w 1 kg jest około 10^{27} elektronów i względne zniszczenia są bardzo małe: można je porównać do uszkodzenia o długości 1 mikrometra na odcinku stukilometrowej drogi. Jednak w złożonych organizmach nawet tak małe zmiany mogą spowodować poważne problemy w ich funkcjonowaniu.

W organizmach żywych skutki biologiczne napromieniowania zależą nie tylko od zdeponowanej energii, ale także od tego, czy dana energia została zużyta na zjonizowanie, czyli tym samym zniszczenie, małej, czy dużej liczby komórek. 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 γ i β wywołują takie same skutki biologiczne, znacznie mniejsze niż skutki wywołane przez promieniowanie α (patrz Tabela I). Cząstka α o energii kilku MeV przekazuje całą swoją energię na drodze rzędu kilkadziesiątu mikrometrów (czyli tylko w kilku komórkach). Natomiast cząstki β o podobnej energii przebywają w organizmie średnio drogę kilku milimetrów, czyli wywołują jonizację w około 100 razy większej liczbie komórek, ale za to w każdej 100 razy mniejszą niż cząstki α . Wynika to z faktu, iż cząstki α są około 4000 razy cięższe od elektronów i jeśli posiadają taką samą energię jak elektrony, to poruszają się kilkadziesiąt razy wolniej i na dodatek mają dwa razy większy ładunek niż elektrony.

Tabela I.

Rodzaj promieniowania	Współczynnik szkodliwości
γ	1
β	1
α	20
protony	5
neutrony	5–20

Dawka równoważna (Sivert) = dawka pochłonięta (Grej) \times współczynnik szkodliwości

A. Hrynkiewicz, PAA, IPJ, 1993. „Dawki i działanie biologiczne promieniowania jonizującego”

Dla promieniowania γ i β
1 Sv = 1 Gy

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 (Tabela I). 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).

Oczywiście ze względu na różnorodne funkcje biologiczne różne komórki różnie reagują na taką samą dawkę promieniowania, dlatego przy określaniu skutków napromieniowania należy także uwzględnić wrażliwość poszczególnych narządów czy tkanek (Tabela II). Po uwzględnieniu wrażliwości otrzymujemy **dawkę skuteczną**, którą podajemy także w Sv.

Tabela II.

Narząd lub tkanka	Względna wrażliwość
gruczoły płciowe	0,20
czerwony szpik kostny	0,12
płuca	0,12
wątroba	0,05
skóra	0,01
powierzchnia kości	0,01

A. Hrynkiewicz, PAA, IPJ, 1993,
„Dawki i działanie biologiczne promieniowania jonizującego”

Tabela II wskazuje, że najbardziej wrażliwe na promieniowanie jądrowe są gruczoły płciowe. Fakt ten można praktycznie wykorzystać przy zwalczaniu szkodników niszczących uprawy rolne, stosując tzw. metodę sterylnych owadów. Metodę tę wykorzystano do wyeliminowania plagi muchówek m.in. na wyspie Capri we Włoszech w 1967 roku. Zamiast rozpylania środków chemicznych wyhodowano w laboratorium muchówki i napromieniowano je dawką, która spowodowała ich bezpłodność, i – ku ogromnemu zdziwieniu mieszkańców – wypuszczono je na wyspę w liczbie dziesiątki razy przekraczającej liczbę muchówek „tubylców”. W ten sposób drastycznie zmniejszono szanse na rozmnożenie się zdrowych osobników, ponieważ prawdopodobieństwo sparowania się dwóch płodnych muchówek stało się bardzo małe. Dlatego w następnym pokoleniu liczba muchówek drastycznie się zredukowała. Powtórzenie operacji doprowadziło do szybkiego pozbycia się plagi bez konieczności użycia środków trujących. Metoda sterylnych owadów jest często stosowana do systematycznego zwalczania wielu szkodników, na przykład muchy śrubowej. Jest to groźny pasożyt składający jaja w ranach zwierząt, z których później wylęgają się larwy żerujące w ciele „gospodarzy”. Dzięki metodzie sterylnych owadów mucha ta została wytępiona w USA i Meksyku, a obecnie realizowany jest program eliminowania jej na terenach niektórych krajów Ameryki Środkowej.

III. Konserwowanie żywności promieniowaniem jądrowym

Żywność skażona bakteriami może spowodować ciężkie choroby, a nawet śmierć. Także w krajach wysoko rozwiniętych infekcje bakteriami *E-coli* czy *Salmonelli* prowadzą do śmierci wielu ludzi. Na przykład w USA rocznie umiera ponad 5000 osób na skutek spożycia żywności skażonej. Dlatego uzdatnianie żywności poprzez redukcję zawartości drobnoustrojów chorobotwórczych oraz zapobieganie jej psuciu się poprzez eliminację bakterii czy grzybów ma ogromne znaczenie, szczególnie, jeśli można to robić bez wprowadzania do pożywienia substancji szkodliwych dla zdrowia. Użycie promieniowania jądrowego daje możliwość nie tylko redukcji drobnoustrojów i ich form zarodnikowych w żywności, ale także może zapobiegać kiełkowaniu roślin, przedłużając znacznie okres możliwego składowania np. ziemniaków, cebuli czy czosnku. Dlatego w Japonii napromieniowuje się ziemniaki na skalę przemysłową już od 1973 roku. Napromieniowanie pozwala także na znaczące wydłużenie okresu przechowywania owoców, przedłuża ich czas dojrzewania i zapobiega rozwijaniu się muszek owocowych.

Procesy konserwowania, pasteryzacji i sterylizacji żywności za pomocą obróbki termicznej czy też dodawanie środków chemicznych związane są ze zmianą smaku, zapachu, koloru i innych właściwości organoleptycznych. Promieniowanie jądrowe może także wywołać takie zmiany, ale występują one w znacznie mniejszym stopniu i tylko w przypadku niektórych artykułów (np. mleka i masła). W większości przypadków zmiany takie występują przy dawkach napromieniowania znacznie większych niż konieczne do sterylizacji.



Rys. 1. Porównanie grupy ziemniaków nienapromieniowanych i napromieniowanych dawką około 200 Gy, po długim czasie przechowywania ich w tych samych warunkach

Konserwować żywność można między innymi poprzez naświetlanie promieniowaniem γ emitowanym przez promieniotwórczy kobalt ^{60}Co lub cez ^{137}Cs .

Przy napromieniowaniu prawdopodobieństwo uszkodzenia molekuly DNA w wirusie, bakterii czy insekcie jest znacznie większe niż prawdopodobieństwo

zniszczenia cząsteczek cukru czy białka, ponieważ molekuly DNA składają się ze znacznie większej liczby atomów. Dodatkowo DNA organizmów żywych w napromieniowanej żywności podlega utlenieniu rodnikami OH, które powstają w ciągu reakcji chemicznych w wyniku jonizacji cząsteczek wody. Dlatego molekuly istotne dla życia mikroobów 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. W ogólności im większe molekuly tworzą genomy danego organizmu, tym większa jest szansa jego śmiertelnego uszkodzenia przy zadanej dawce napromieniowania. Dlatego dawka śmiertelna dla bakterii posiadających krótsze łańcuchy DNA jest większa niż dawka dla większych pasożytów.

Tabela III.

	Dawka śmiertelna [Sv] (50% populacji umiera w ciągu 30 dni)
Wirusy	5000
Ameba	1000
Osa	1000
Wąż	800
Ryba	8,5
Szczur	8
Małpa	5
Człowiek	3

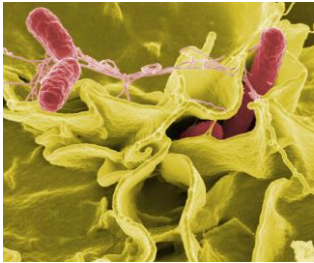
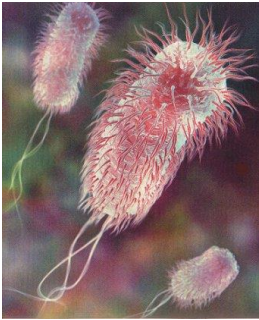
A. Hrynkiewicz PAA, IPJ, 1993,
„Dawki i działanie biologiczne promieniowania jonizującego”

Dawki promieniowania muszą być tak dobrane, by zniszczyć większość mikroorganizmów. W Tabeli III pokazane są dawki śmiertelne dla kilku wybranych istot żywych. Jak widać im mniej „skomplikowany” jest organizm tym trudniej go uszkodzić. Najbardziej odporne na napromieniowanie jądrowe są wirusy. Ale w przypadku wirusów, z przymrużeniem oka można powiedzieć, że jest kwestią debaty filozoficznej czy są to w ogóle istoty żywe. Nie ma takich wątpliwości już co do bakterii i okazuje się, że do wyeliminowania większości bakterii *Salmonelli* czy *E-coli* (patrz Tabela IV) wystarczają dawki rzędu kilkuset Gy. Zaskakującym w tym zestawieniu jest fakt, że jest to dawka mniejsza od dawki śmiertelnej dla osy czy węża.

W praktyce przy konserwowaniu żywności stosuje się dawki do 10 000 Gy, co (patrz Tabela III) pozwala na pozbycie się nawet większości wirusów. Tak duża dawka promieniowania γ w porównaniu ze średnią dawką śmiertelną dla człowieka, która wynosi ok. 3 Gy, na pierwszy rzut oka mogłaby wydawać się bardzo niepokojąca. W tym kontekście można zauważyć, że przygotowanie pieczonej kiełbasy na ognisku lub też ugotowanie ziemniaków także wiąże się

z przekroczeniem „dawki śmiertelnej” dla człowieka o tysiące razy. Na przykład gotowanie ziemniaków trwa około pół godziny, czyli ok. 2000 sekund; aż strach pomyśleć o dalszej części tego wywodu...

Tabela IV.

<p style="text-align: center;"><i>Salmonella</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>E-coli</i></p> 
<p style="text-align: center;">Dawka powodująca eliminację 90% populacji – 500 Gy</p>	<p style="text-align: center;">Dawka powodująca eliminację 90% populacji – 300 Gy</p>

Konserwując żywność promieniowaniem jądrowym nie nasświetla się samego człowieka, a **po procesie nasświetlania żywność nie staje się promieniotwórcza**. Energia promieniowania γ czy elektronów używanych do konserwowania żywności jest wielkości kilku MeV i jest to zbyt mało by wywoływać przemiany jądrowe!

Energia całkowita przekazywana do napromieniowanej żywności w procesie konserwowania jest też wielokrotnie mniejsza niż w przypadku typowych procesów w trakcie przygotowywania posiłków. Przeliczmy na przykład ile energii pochłania ziemniak, czy jeszcze prościej woda przy podgrzewaniu od 20 do 100°C. Jest to $\sim 4000 \text{ J/kg/}^\circ\text{C} \times 80^\circ\text{C} = 320\,000 \text{ J/kg}$, czyli 32 razy więcej w porównaniu z dawką promieniowania $10\,000 \text{ Gy} = 10\,000 \text{ J/kg}$.

Naturalne wydają się dwa pytania: czy żywność napromieniowana tak dużymi dawkami nie traci właściwości odżywczych? czy nasświetlanie promieniowaniem jądrowym nie powoduje powstawania szkodliwych dla zdrowia substancji toksycznych?

Badania wykazują, że wartość odżywcza wynikająca z zawartości białka, tłuszczu i węglowodanów nie zmniejsza się w wyniku konserwacji promieniowaniem jądrowym. Można to uzasadnić biorąc pod uwagę, że liczba uszkodzeń danej molekuly zależy liniowo od dawki i w przybliżeniu także liniowo od liczby stanowiących ją atomów. I tak w przypadku nasświetlenia dawką 1000 Gy,

powodującą likwidację 99% bakterii *Salmonelli* jedynie 0,0000001% cząstek cukrów czy aminokwasów ulegnie uszkodzeniu.

Gorzej jest z witaminami, ich zawartość w pożywieniu na skutek napromieniowania ulega zmniejszeniu od kilku do kilkudziesięciu procent. Jest to w dużym stopniu zależne od rodzaju składników stanowiących pożywienie i wynika raczej z oddziaływania chemicznego witamin z innymi substancjami, na przykład rozpuszczania witamin w tłuszczu lub w wodzie. Dlatego zubożenie pożywienia w witaminy na skutek konserwowania radiacyjnego następuje w stopniu podobnym jak w przypadku konserwowania innymi standardowymi metodami termicznymi czy chemicznymi. W niektórych przypadkach, np. witaminy B1, nieco większe straty powoduje obróbka termiczna niż napromieniowanie, a w innych przypadkach jest odwrotnie. Tak czy inaczej, witaminy w pożywieniu ulegają rozkładowi także wtedy, gdy żywność nie jest konserwowana a napromieniowanie nie zmienia tego w sposób znaczący. Przykładem może tu być witamina C, która przy niestarannym składowaniu owoców czy warzyw może rozłożyć się nawet w 100%.

Badania właściwości napromienionej żywności pod kątem jej potencjalnej toksyczności były prowadzone przez wiele lat w wielu różnych ośrodkach. Oprócz analizy samej napromienionej żywności badano także jej wpływ na zdrowie zwierząt. W starszych książkach można znaleźć wzmianki o badaniach wpływu żywności konserwowanej radiacyjnie na przemianę materii w grupach ochotników. W Chinach na początku lat osiemdziesiątych badano także ewentualny wpływ spożywania napromienionej żywności na aberacje chromosomowe u ludzi. Do badań napromieniowywano żywność dawkami do ok. 60 000 Gy. Wynikiem wspomnianych i innych doświadczeń prowadzonych w wielu krajach jest wniosek, że napromieniowanie jądrowe żywności nie ma żadnego wpływu na zdrowie ludzi, a także nie pogarsza walorów spożywczych i smakowych produktów. Niestety także ich nie polepsza. Na podstawie tych badań Organizacja do Spraw Wyżywienia i Rolnictwa przy ONZ (FAO), Międzynarodowa Agencja do Spraw Energii Atomowej (IAEA) oraz Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) zalecają napromieniowanie żywności dawkami do 10 000 Gy, stwierdzając jednocześnie, że napromieniowanie dawkami większymi nie ma negatywnego wpływu na jej jakość.

Żywność dla kosmonautów, wojska czy szpitali jest często napromieniowywana dawkami większymi niż 10 000 Gy. W USA dopuszcza się nawet 30 000 Gy przy napromieniowaniu przypraw.

Promieniowanie jądrowe wykorzystuje się także do wielu innych celów, na przykład do konserwacji zabytków, uzdatniania wody czy sterylizacji przeszczepów. W celu wyniszczenia prawie wszystkich potencjalnych skażeń bakteriami, przeszczepy napromieniowuje się dawkami rzędu 35 000 Gy. Ogromna zaleta sterylizacji radiacyjnej w medycynie polega na tym, że można ją stosować także dla tych materiałów, które pod wpływem temperatury uległyby

zniszczeniu oraz można dokonywać sterylizacji materiałów po ich uprzednim opakowaniu, unikając w ten sposób możliwości wtórnego zakażenia. Dotyczy to w szczególności wszelkiego rodzaju narzędzi chirurgicznych i materiałów opatrunkowych.

W Polsce sterylizacja radiacyjna sprzętu i materiałów medycznych, jak również konserwowanie radiacyjne żywności wykonywane jest na przykład w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie, gdzie do tego celu wykorzystuje się wiązkę elektronów o energii 10 MeV.

IV. Jak sprawdzić czy żywność była napromieniowana

Zmiany składu produktów żywnościowych przy napromieniowaniu jądrowym są tak małe, że nie da się ich ani zobaczyć, ani wywęchać, w przeciwieństwie do innych zmian zachodzących w trakcie gotowania czy smażenia. Zastosowanie analizy chemicznej także nie jest skuteczną metodą badania czy żywność była napromieniowana, ponieważ większość substancji pojawiających się przy napromieniowaniu występuje także w wyniku utrwalania żywności innymi metodami np. obróbki cieplnej. Dlatego znalezienie skutecznych sposobów wykrywania napromieniowania żywności było i jest trudne, i dopiero w latach dziewięćdziesiątych udało się wprowadzić kilka metod do praktycznego zastosowania.

Jedna z takich metod opiera się na wyekstrahowaniu z żywności minerałów i poddaniu ich analizie termoluminescencyjnej, która polega na szybkim podgrzaniu badanej próbki i pomiarze intensywności emitowanych fotonów. W pułapkach sieci krystalicznych minerałów więzione są elektrony, które zostały oderwane od atomów w wyniku oddziaływania z promieniowaniem jądrowym. Przy podgrzewaniu, pod wpływem energii dostarczonej do sieci, elektrony te, przechodząc ze stanów wzbudzonych do stanów podstawowych, powodują luminescencję (emisję fotonów). W celu stwierdzenia czy produkt był napromieniowany, po wstępnym pomiarze widma intensywności luminescencji, napromieniowuje się go dawką 1000 Gy, ponownie podgrzewa i drugi raz mierzy intensywność luminescencji. W przypadku, gdy minerały zostały wyekstrahowane z żywności napromieniowanej, ponowne napromieniowanie nie ma dużego wpływu na intensywność luminescencji. Gdy produkt był nienapromieniowany, to po naświetleniu dawką 1000 Gy jego luminescencja wzrośnie ponad dziesięciokrotnie. Wiele innych ciekawych metod detekcji napromieniowania zostało omówionych w artykule A. Dancewicza. Na koniec wspomnę, w ramach ciekawostki, że w miarę łatwo można stwierdzić napromieniowanie ziemniaków mierząc ich przewodnictwo elektryczne, które maleje w czasie po wbiciu do ziemniaka elektrod, a po kilku minutach osiąga wartość stałą. Napromieniowanie można wykryć, ponieważ wartość końcowa przewodnictwa ziemniaka nie zależy od tego czy był on napromieniowany, czy nie, ale po napromieniowaniu istotnemu zmniejszeniu ulega wartość początkowa.

Nawet bez odpowiedniej aparatury badawczej, żywność konserwowaną za pomocą promieniowania jądrowego możemy łatwo rozpoznać, ponieważ jest ona oznaczana poniższym symbolem.



Literatura

- [1] Juraj Tölgyessy, Milan Kenda, *Alfa, Beta, Gamma Promienie Nadziei*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1984.
- [2] Facts about food irradiation, <http://www.physics.isu.edu/radinf/food.htm>
- [3] J. Scott, S. Pillai, *Irradiation and Food Safety*, Technology **58** (2004) 48.
- [4] A.M. Dancewicz, *Wykrywanie Napromieniowania Żywności*, Postępy Techniki Jądrowej **23** (2000) 10.
- [5] W. Stachowicz, A. Kamiński, J. Michalik, *Sterylizacja przeszczepów chirurgicznych promieniowaniem jonizującym*, Postępy Techniki Jądrowej **50** (2007) 9.
- [6] A. Hrynkiewicz, *Dawki i działanie biologiczne promieniowania jonizującego*, Państwowa Agencja Atomistyki (1993).
- [7] E.S. Josephson, M.H. Thomas, W.K. Calhoun, *Nutritional aspects of food irradiation: an overview*, Journal of Food Processing and Preservation **2** (1978) 299.