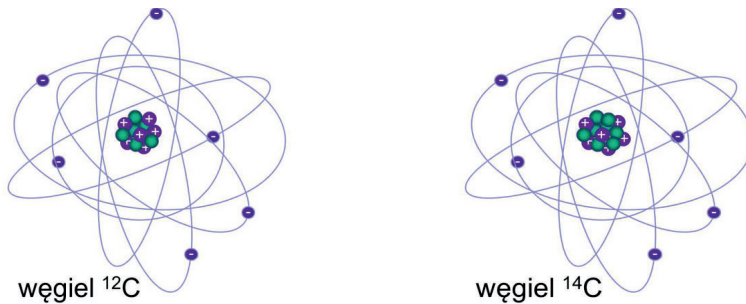


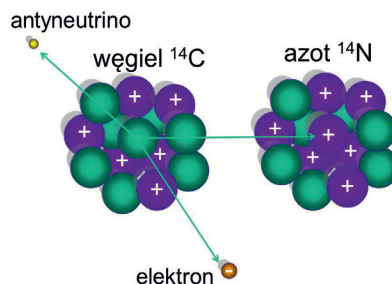
Metoda datowania węglem ^{14}C . Skąd wiemy, kiedy wymarły mamuty

Węgiel ^{14}C jest atomem, którego jądro atomowe zawiera 6 protonów i 8 neutronów, czyli o dwa neutrony więcej niż atom „zwykłego” węgla ^{12}C zawierającego 6 protonów i 6 neutronów (rys. 1).



Rys. 1. Atomy węgla z jądrem zawierającym 12 nukleonów (z lewej) i z jądrem zawierającym 14 nukleonów (z prawej). Liczby elektronów i protonów w obu atomach są takie same, jądra różnią się jedynie liczbą neutronów. Protony posiadają ładunek elektryczny dodatni, dlatego oznaczone są znakiem „+”, elektrony posiadają ładunek ujemny „-”, natomiast neutrony są elektrycznie obojętne

Jądra atomów węgla ^{12}C są stabilne natomiast jądra węgla ^{14}C są nietrwałe i rozpadają się, emitując elektrony i neutrino. Rozpad ten polega na przemianie neutronu w proton powodującej zamianę jądra węgla ^{14}C w jądro azotu ^{14}N (rys. 2).



Rys. 2. Rozpad promieniotwórczy jądra ^{14}C na antyneutrino, elektron i jądro azotu ^{14}N

Czas połowicznego zaniku jąder węgla ^{14}C wynosi około 5730 lat. Oznacza to, że jeśli w danej chwili mamy na przykład 1 000 000 jąder węgla ^{14}C to po około 5730 latach zostanie z nich tylko połowa, czyli 500 000, a druga połowa zamieni się w azot ^{14}N . Zatem, oznaczając liczbę atomów węgla ^{14}C przez $L_{^{14}\text{C}}$, możemy napisać, że:

$$L_{^{14}\text{C}}(\text{po } 5730 \text{ latach}) = \frac{L_{^{14}\text{C}}(\text{w chwili początkowej})}{2} \quad (1)$$

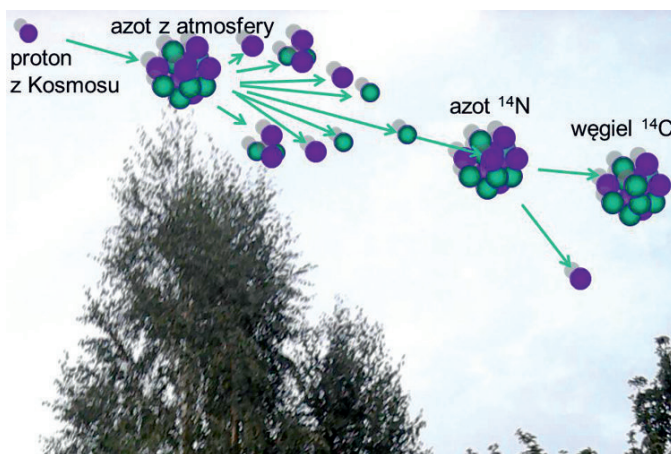
Przez następne 5730 lat (czyli po 11 460 latach) z tych 500 000 jąder ^{14}C znowu połowa się rozpadnie, czyli zostanie 250 000, co można wyrazić równaniem:

$$L_{^{14}\text{C}}(\text{po } 11\,460 \text{ latach}) = \frac{L_{^{14}\text{C}}(\text{po } 5730 \text{ latach})}{2} = \frac{L_{^{14}\text{C}}(\text{w chwili początkowej})}{2 \times 2} \quad (2)$$

W ogólności otrzymujemy następujące wyrażenie na liczbę ocalałych jąder po N_{latach} :

$$L_{^{14}\text{C}}(\text{po } N_{\text{lat}}) = \frac{L_{^{14}\text{C}}(\text{w chwili początkowej})}{2^{\left(\frac{N_{\text{lat}}}{5730}\right)}} \quad (3)$$

Węgiel ^{14}C powstaje w górnych warstwach atmosfery. Najpierw protony promieniowania kosmicznego wytwarzają neutrony w wyniku reakcji jądrowych z jądrami różnych atomów atmosfery. Następnie te neutrony w reakcji z jądrami azotu, stanowiącego główny składnik atmosfery, mogą prowadzić do powstania węgla ^{14}C na skutek reakcji $n + ^{14}\text{N} \rightarrow p + ^{14}\text{C}$ (rys. 3).



Rys. 3. Łańcuch reakcji jądrowych inicjowany promieniowaniem kosmicznym prowadzący do powstania izotopów węgla ^{14}C . Węgiel ^{14}C powstaje głównie w rejonie przejściowym między stratosferą a troposferą około 12 km nad powierzchnią Ziemi. Cząstki promieniowania kosmicznego o dużych energiach rozbijają jądra atomów atmosfery na małe fragmenty, którymi mogą być nie tylko pojedyncze protony i neutrony, ale także w przykładowe jądra trytu (^3H). Powstałe w wyniku takich reakcji neutrony mogą mieć bardzo małe energie co jest warunkiem wymaganym do zajścia procesu $n + ^{14}\text{N} \rightarrow p + ^{14}\text{C}$

Jako że w pierwszym przybliżeniu natężenie promieniowania kosmicznego nie zmienia się istotnie w skali tysięcy lat, to można przyjąć, że stosunek zawartości węgla ^{14}C do węgla ^{12}C istniejący w atmosferze Ziemi wiele tysięcy lat temu był taki sam jak teraz; wynosi on około 10^{-12} . Oznacza to, że w atmosferze węgla ^{12}C jest milion milionów razy więcej niż węgla ^{14}C . Atomy węgla ^{14}C podobnie jak atomy zwykłego węgla ^{12}C w wyniku reakcji chemicznych z tlenem tworzą molekuły dwutlenku węgla $^{14}\text{CO}_2$.

Węgiel ^{14}C zużywany jest przez organizmy żywe identycznie jak zwykły węgiel ^{12}C , ponieważ właściwości chemiczne atomów zależą jedynie od konfiguracji elektronów, a zarówno ^{12}C jak i ^{14}C posiadają po 6 elektronów i ładunek ich jąder atomowych jest taki sam. Dlatego w trakcie życia organizmu węgiel ^{14}C podobnie jak węgiel ^{12}C wchłaniany jest poprzez wdychanie gazu CO_2 znajdującego się w powietrzu, poprzez zjadanie roślin, które ten węgiel wchłonęły, zjadanie zwierząt, które odżywiały się roślinami itp. Rośliny na przykład produkują w wyniku fotosyntezy oprócz zwykłego cukru także cukier radioaktywny:



Po śmierci procesy metaboliczne ustają, organizm przestaje wchłaniać węgiel i z biegiem lat stosunek zawartości węgla ^{14}C do węgla ^{12}C ulega zmianie, ponieważ węgiel ^{14}C jest izotopem promieniotwórczym, który ulega rozpadowi, a węgiel ^{12}C jest stabilny.

W momencie śmierci organizmu stosunek liczby atomów węgla ^{14}C do ^{12}C wynosi około 10^{-12} i potem cały czas maleje. Pomimo, iż zawartość węgla ^{14}C jest tak mała, można ją określić mierząc aktywność promieniowania beta, ponieważ detektory (sondy) do pomiaru promieniowania jądrowego pozwalają na rejestrowanie nawet pojedynczych aktów rozpadu. W tym przypadku chodzi o zarejestrowanie elektronów wylatujących z jąder. Żeby na przykład określić wiek kości mamuta, musimy wyodrębnić z niej węgiel i sprawdzić, jaka jest jego aktywność promieniotwórcza odpowiadająca rozpadom jąder węgla ^{14}C . Znając aktywność obliczamy, ile jest tam atomów węgla ^{14}C . Tę wyznaczoną w pomiarze liczbę atomów ^{14}C oznaczmy przez $L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}})$. Liczbę lat, które upłynęły od momentu śmierci (N_{lat}) możemy powiązać z liczbą atomów węgla ^{14}C korzystając z równania (3):

$$L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}}) = \frac{L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{śmierci}})}{2^{\left(\frac{N_{\text{lat}}}{5730}\right)}} \quad (4)$$

Rozwiązanie tego równania ze względu na N_{lat} wymaga jeszcze wyznaczenia, ile atomów węgla było w badanej próbce w momencie śmierci, czyli ile wynosi $L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{śmierci}})$. Zakładając, że promieniowanie kosmiczne nie zmienia się z biegiem lat możemy uznać, że w momencie śmierci badanego organizmu stosunek $L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{śmierci}})/L_{^{12}\text{C}}(t_{\text{śmierci}}) = 10^{-12}$, czyli że wynosi on tyle, ile obserwujemy obecnie. Fakt, że węgiel ^{12}C jest stabilny pozwala nam przyjąć, że $L_{^{12}\text{C}}(t_{\text{śmierci}}) = L_{^{12}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}})$. Otrzymujemy zatem, że $L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{śmierci}}) = 10^{-12} \times L_{^{12}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}})$ i po podstawieniu do równania (4) otrzymujemy:

$$L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}}) = \frac{10^{-12} \times L_{^{12}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}})}{2^{\left(\frac{N_{\text{lat}}}{5730}\right)}} \quad (5)$$

Powyzsze równanie po określeniu w pomiarze $L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}})$ oraz $L_{^{12}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}})$ pozwala na obliczenie liczby N_{lat} , które upłynęły od śmierci badanego organizmu do chwili pomiaru:

$$N_{\text{lat}} = 5730 \times \log_2 \frac{10^{-12} \times L_{^{12}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}})}{L_{^{14}\text{C}}(t_{\text{pomiaru}})} \quad (6)$$



Logarytm to działanie związane z potęgowaniem; $\log_a b$ (czytaj: logarytm o podstawie a z liczby b) to taka liczba c , że $a^c = b$, np. $\log_2 8 = 3$ bo $2^3 = 8$.

Ogólnie, pomiar zawartości węgla ^{14}C może być używany do określania wieku substancji, które kiedyś stanowiły część organizmów żywych i które zawierają węgiel. W praktyce opisaną metodę można stosować do określania wieku szczątków organizmów żywych, których wiek nie przekracza 60 000 lat. W 1960 roku za opracowanie tej metody Willard F. Libby otrzymał Nagrodę Nobla.



Willard F. Libby (źródło: http://www.columbia.edu/~rwl4/libby_willard_1.jpg)

Zastanówmy się, ile jest atomów węgla radioaktywnego ^{14}C w organizmie człowieka i jaki jest przyczynek do naturalnej dawki napromieniowania pochodzący od węgla ^{14}C zawartego w organizmie?

Wiemy, że około 18% wagi człowieka stanowi węgiel. Zatem w człowieku ważącym 70 kg jest aż 12,6 kg węgla. Biorąc pod uwagę, że jeden atom węgla waży około 2×10^{-26} kg otrzymujemy, że w człowieku znajduje się $6,3 \times 10^{26}$ atomów węgla, z czego około $6,3 \times 10^{26} / 10^{12} = 6,3 \times 10^{14}$ to atomy węgla ^{14}C .

Dzieląc czas połowicznego zaniku węgla ^{14}C przez $\ln 2$ (5730 lat / $\ln 2$) otrzymujemy, że średni czas życia jednego jądra ^{14}C wynosi 8270 lat.

Stąd możemy obliczyć aktywność (czyli liczbę rozpadów na jednostkę czasu) jako liczbę atomów węgla ^{14}C podzieloną przez ich średni czas życia i otrzymujemy: $6,3 \times 10^{14} / 8270 \text{ lat} = 7,6 \times 10^{10}$ rozpadów na rok, co odpowiada 2400 rozpadom na sekundę. Wydaje się, że to bardzo dużo. Obliczmy zatem, jaką dawkę napromieniowania otrzymujemy w wyniku tych rozpadów. Miarą napromieniowania jest energia deponowana przez promieniowanie na jednostkę masy (Sivert = J/kg). Średnia energia elektronu z rozpadu węgla ^{14}C wynosi około 50 000 eV (elektronowoltów, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ jest energią, którą uzyskuje elektron przyspieszony napięciem 1 V). Elektrony te są pochłaniane w organizmie. Zatem energia, którą deponują w tkankach w ciągu jednego roku wynosi:

$$\begin{aligned} 7,6 \times 10^{10} \times 50\,000 \text{ eV} &= 3,8 \times 10^{15} \text{ eV} = \\ &= 3,8 \times 10^{15} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} = 6,1 \times 10^{-4} \text{ J} \end{aligned}$$

Stąd dawka roczna napromieniowania człowieka w wyniku zawartego w organizmie węgla ^{14}C wynosi:

$$6,1 \times 10^{-4} \text{ J} / 70 \text{ kg} = 0,087 \times 10^{-4} \text{ Sv} = 0,0087 \text{ mSv}$$

Dawka ta stanowi przyczynek w wielkości jedynie około 0,4% do dawki promieniowania, którą otrzymujemy w Polsce od innych źródeł naturalnych (2,4 mSv). Znacznie większy wkład do napromieniowania od wewnątrz ma znajdujący się w organizmie człowieka potas ^{40}K , a największy wkład do dawki naturalnej ma radon.

