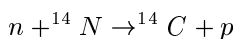


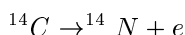
Fizyczne metody datowania w badaniu prehistorii człowieka

Homo sapiens to jedyny w swoim rodzaju gatunek spotykany w przyrodzie. Jedną z wyróżniających go cech jest to, że stawia sobie pytania o swoją własną przeszłość. Kiedy pojawił się na naszej planecie? Jak do tego doszło? Czy wyodrębnił się spośród innych gatunków w sposób ciągły, na drodze powolnej ewolucji, czy też raczej skokowy, z wyraźnie określonym początkiem? Jeśli ciągły, to jak wyglądały ogniwa pośrednie? Jeśli skokowy, to jaki był mechanizm tego skoku?

Te i inne pytania są domeną poszukiwań archeologicznych. Kiedy jednak archeolog znajdzie interesujący obiekt i zadaje sobie pytanie z jakiego okresu on pochodzi, z pomocą przychodzi fizyka. Największe usługi oddała tu metoda radioizotopowa oparta na rozpadzie izotopu węgla ^{14}C . Izotop ten jest produkowany w atmosferze przez neutrony powstałe wskutek oddziaływania protonów promieniowania kosmicznego z atmosferą



w ilości ok. 7.5 kg na rok. Rozpada się on samorzutnie z czasem połowicznego rozpadu $\tau_{1/2} = 5730$ lat



Równowaga pomiędzy produkcją a rozpadem ustala się na poziomie

$${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C} = 1.5 \cdot 10^{-12}$$

W atmosferze ^{14}C łączy się z tlenem tworząc radioaktywny dwutlenek węgla ${}^{14}\text{CO}_2$, który może być absorbowany przez rośliny podobnie jak normalny ${}^{12}\text{CO}_2$. Stąd może się też przedostawać do organizmów zwierzęcych. Dopóki organizm żyje i odżywia się, zachowuje stały stosunek ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$. Od momentu śmierci przestaje uzupełniać rozpadający się ${}^{14}\text{C}$, co powoduje zmniejszanie się stosunku ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$. Mierząc ten stosunek w badanej próbce możemy zatem określić czas jaki upłynął od śmierci organizmu.

Metodę węgla ${}^{14}\text{C}$ opracował Willard F. Libby w 1947 r. za co 13 lat później otrzymał nagrodę Nobla. Pierwszym sprawdzianem metody było porównanie zmierzonego wieku piramid egipskich z zapiskami historycznymi. Udało się odtworzyć cały szereg dat z przedziału 2000-5000 lat temu z dokładnością do kilku stuleci. Pierwszym odkrywczym zastosowaniem tak sprawdzonej metody było określenie wieku znanego z Biblii miasta Jerycho na 7000-8000 lat, dwa razy więcej niż dotychczas przypuszczano.

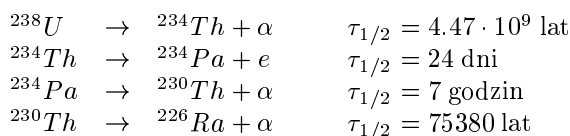
Aby poprawić dokładność pomiarów metodą ${}^{14}\text{C}$ należy uwzględnić zmiany stosunku ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ w atmosferze spowodowane zmianami intensywności promieniowania kosmicznego, klimatycznymi, itp. Takie cechowanie można przeprowadzić porównując zmierzony wiek bardzo starych drzew z liczbą słoï w ich przekroju. Najlepiej do tego celu nadają się sosny *pinus aristata longaeva* rosnące w kalifornijskich górach White-Inyo. Najstarszy żywy okaz ma 4764 lata. Porównując zgęszczenia słoïw (spowodowane chłodniejszym klimatem) młodszych i starszych drzew możemy tę metodę rozszerzyć do ok. 10 000 lat.

Pierwotnie zawartość ${}^{14}\text{C}$ oceniano mierząc intensywność promieniowania licznikami gazowymi (np. Gaigera) lub

scyntylacyjnymi. Od lat 80-tych liczbę atomów ${}^{14}\text{C}$ ocenia się wyodrębniając je z próbki za pomocą akceleratora sprzężonego ze spektrometrem masowym. Spektrometr masowy jest to magnes, który pod różnymi kątami odchyła rozprężone w akceleratorze jony o różnych stosunkach masy i ładunku. Próbka (grafit lub CO_2) jest jonizowana ujemnie (aby uniknąć pomyłki z ${}^{14}\text{N}$) przez bombardowanie jonami cezu. Powstałe jony formuje się w wiązkę o energii typowo 25 kiloelektronowoltów i przepuszcza przez spektrometr I stopnia, który wybiera jony o masie 14: ${}^{14}\text{C}^-$, ${}^{13}\text{CH}^-$, ${}^{12}\text{CH}_2^-$. Wiązka ta jest następnie przyspieszana do energii 1 Megaelektronowolta (MeV) i zderzana z cząsteczkami gazu w celu rozbicia ${}^{13}\text{CH}^-$ i ${}^{12}\text{CH}_2^-$. Ostatecznie wiązkę rozpręda się do 8 MeV i spektrometrem II stopnia wybiera ${}^{14}\text{C}$.

Metoda akceleratorowa jest dużo czulsza od tradycyjnej, gdyż do pomiaru wykorzystywane są wszystkie atomy ${}^{14}\text{C}$ z próbki, a nie tylko te, które się aktualnie rozpadają. Metoda ta pozwala sięgać do 40-50 tysięcy lat wstecz. Ograniczeniem jest tu zwykle czystość próbki. Po 40 000 lat zawartość ${}^{14}\text{C}$ zmniejsza się do 1%. Tak więc domieszka 1% „nowego” węgla może dowolnie starą próbkę „odmłodzić” do 40 000 lat.

Aby sięgnąć wstecz jeszcze dalej można zastosować radioizotopy o dłuższych czasach rozpadu. Do oznaczania wieku skamielin wykorzystuje się szereg uranowo-torowy:



gdzie U oznacza uran, Th – tor, Pa – protaktyn, Ra – rad, e – elektron, α – jądro helu złożone z dwóch protonów i dwóch neutronów. Uran rozpuszcza się w wodzie, tor nie. Dłatego skały osadowe w momencie tworzenia zawierają uran, a są wolne od toru. Stosunek ${}^{238}\text{U}$ do powstałego zeń ${}^{230}\text{Th}$ pozwala więc określić wiek skamieliny.

Metoda potasowo-argonowa używana do datowania skał bazaltowych wykorzystuje reakcje:



Argon ulatnia się z roztopionej lawy. W momencie zastygnięcia lava zawiera ${}^{40}\text{K}$, a jest wolna od ${}^{40}\text{Ar}$. Zawartość nowopowstałego ${}^{40}\text{Ar}$ w skale bazaltowej pozwala określić moment jej zastygnięcia.

Najnowocześniejsze metody datowania wykorzystują zjawiska związane z defektami struktur krystalicznych. W niektórych kryształach (kwarc, kalcyt) elektrony mogą być przeniesione z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa dzięki promieniowaniu naturalnemu (${}^{232}\text{Th}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{87}\text{Rb}$, ${}^{40}\text{K}$) lub kosmiczemu. Dyfundując mogą napotkać defekty sieci, w których zostaną uwięzione. Dostarczenie energii do próbki powoduje ich uwolnienie, po którym może nastąpić emisja fotonu. Tego typu emisję nazywamy luminescencją. W metodzie **termoluminescencyjnej** energii dostarcza się podgrzewając próbkę. Metoda ta mierzy więc czas od ostatniego „wyzerowania” próbki, tj. uwolnienia wszystkich elektronów, co zachodzi w temperaturze powyżej 300°C. Mogło do tego dojść np. podczas rozgrzewania krzemienego narzędzia w ogniu, bądź podczas

wypalania wyrobów garncarskich. Im dłuższy czas minął od wyzerowania próbki, tym więcej elektronów w pułapkach a więc i tym silniejsza luminescencja. W praktyce pomiar składa się z trzech faz:

1. Pomiar intensywności luminescencji L podgrzanej próbki.
2. Naświetlenie źródłem wzorcowym w celu znalezienia dawki P potrzebnej do wywołania luminescencji L .
3. Ocena rocznej dawki D zaabsorbowanej przez próbkę poprzez pomiar promieniowania w miejscu znaleziska lub pomiar laboratoryjny przywiezionej stamtąd gleby.

Wiek próbki określa się jako iloraz P/D .

W metodzie **wymuszonej fotoluminescencji** elektrony uwalnia się naświetlając próbkę. Metoda ta jest czulsza od termoluminescencyjnej, gdyż uwalniane są w niej jedynie elektrony z płytszych pułapek i do wyzerowania próbki wystarcza jej silne nasłonecznienie. Dlatego nadaje się do datowania lessu, wydm, pyłu w lodowcach, dna morskiego itp.

Liczbę elektronów w pułapkach można też mierzyć za pomocą **rezonansu spinowego**. Próbkę umieszcza się w silnym, statycznym polu magnetycznym rzędu 1 tesli, które powoduje rozszczepienie poziomów energetycznych różnych stanów spinowych elektronów. Próbkę poddaje się następnie działaniu mikrofal o częstotliwości rzędu 1 GHz. Rezonansowe pochłanianie energii mikrofal zachodzi gdy ich częstość odpowiada rozszczepieniu. Metoda ta ma olbrzymie zasługi w badaniu prehistorii człowieka, gdyż znakomicie nadaje się do datowania emalii na zębach.

Na zupełnie innej zasadzie opierają się metody **magnetyczne**. Domeny tlenku żelaza w rozgrzanym materiale (lawą, glina w piecu garncarskim) układają się zgodnie z polem magnetycznym Ziemi. Zmienność kierunku ziemskiego pola w przeszłości pozwala na wykorzystanie „zamrożonej” magnetyzacji do datowania. W ciągu ostatnich 3 milionów lat bieguny ziemskiego magnesu zamieniały się miejscami 6 razy!

Odrębną grupę metod datowania stanowią metody **astroklimatyczne**. Opierają się one na korelacjach zmian położenia Ziemi względem Słońca i długoterminowych zmian klimatycznych oraz ich efektów fizycznych i biologicznych. Ograniczymy się tutaj jedynie do podania kilku przykładów. Poziom oceanów był niższy w okresach zlodowaceń. Bogatsze nagromadzenie pyłków kwiatowych w osadach świadczy o okresach ocieplenia. Przenikalność magnetyczna osadów jest zależna od rozpuszczania magnetytu w procesach biologicznych. Bada się także względne stężenia izotopów. Np. stosunek $^{18}O/^{16}O$ jest czuły na temperaturę, zaś $^{13}C/^{12}C$ jest zależny od intensywności fotosyntezy. Poszukuje się coraz to nowych korelacji tego typu i choć metody na nich oparte są generalnie bardziej zawodne od metod radioizotopowych czy luminescencyjnych, stanowią często ich sprawdzian i cenne uzupełnienie.

Zobaczmy teraz jak omówione metody przyczyniły się do poznania prehistorii człowieka. Do początków lat 80-tych panowało przekonanie, że rozwój biologicznych przodków człowieka zachodził równolegle na kilku kontynentach. *Homo erectus*, który pojawił się w Afryce ok. 2 mln lat temu rozprzestrzenił się na całą Europę i Azję. Znalezione nawet dziecko *homo erectus* na Jawie. „Normalne” namag-

nesowanie minerałów wokół znaleziska pozwoliło umiejscowić jego wiek między 1.79 a 1.95 mln lat temu. *Homo erectus* przekształcał się stopniowo w *archaic homo sapiens* by około 100 tys. lat temu dać początek *homo neandertalsis*. W środowiskach odizolowanych *homo erectus* przetrwał niemalże do „naszych czasów”. Świadczą o tym dwa znaleziska na Jawie datowane za pomocą rezonansu spinowego na 53 ± 4 i 27 ± 2 tys. lat!

Neandertalczyk wyginął kilkadziesiąt tys. lat temu. Niemal jednoczesne pojawienie się „nowoczesnego człowieka” (*homo sapiens sapiens*) wydawało się wskazywać, że pochodzi on bezpośrednio od Neandertalczyka. Przełom przyniosły badania szczątków obu tych gatunków znalezionych w kilku jaskiniach izraelskich. Metoda termoluminescencyjna wykazała, że w jaskini Kebara Neandertalczyki przebywali mniej więcej od 48 do 62 tys. lat temu. W pobliskiej jaskini Qafzeh *homo sapiens sapiens* pojawił się już 90-100 tys. lat temu. Metodą rezonansu spinowego poprawiono ten wynik na 120 ± 8 tys. lat i określono wiek czaszek *homo sapiens sapiens* z jaskini Skhul na 110 ± 10 tys. lat. Te i inne nowe odkrycia sugerują, że *homo sapiens sapiens* i *homo neandertalsis* to dwie różne gałęzie wywodzące się ze wspólnego pnia *archaic homo sapiens*. Neandertalczyk rozwinął się na Bliskim Wschodzie i w Europie, podczas gdy *homo sapiens sapiens* powstał w Afryce i stamtąd rozprzestrzenił się na wszystkie kontynenty. W Europie pojawił się ok 35 tys. lat temu. Szybko wyparł Neandertalczyka i utworzył kulturę zwaną *Cro Magnon* znaną z pięknych malowideł jaskiniowych.

Niespodziewanie, silnego poparcia tej hipotezie dostarczyła genetyka. Podjęto szereg prób wyznaczenia wieku i genotypu wspólnego przodka badanej grupy ludzi poprzez „odtworzenie w tył” mutacji koniecznych do wygenerowania obserwowanej różnorodności. W 1987 r. świat obiegła wiadomość, że oto znaleziono „genetyczną Ewę”. Grupa prof. A. Wilsona użyła do badań fragmentu mitochondrialnego DNA, które jest dziedziczone tylko od matki. Próbkę stanowiło 147 ludzi z Afryki, Azji, Australii i Nowej Gwinei. Zrekonstruowane „drzewo genealogiczne” okazało się wyrastać z Afryki 140-290 tys. lat temu i wypuszczać odnogę na pozostałe kontynenty 90-180 tys. lat temu.

W następnych latach inne grupy opublikowały podobne rezultaty. Część z nich używała fragmentów chromosomu Y dziedziczonych tylko od ojca, aby sprawdzić męską część drzewa. A oto zestawienie niektórych wyników:

rok	lider grupy	próbka	cel	tys. lat
1987	A. Wilson	147	„Ewa” Wyjście z Afryki	140-920 90-180
1995	K. Tamura		„Ewa”	120-470
1995	M.F. Hammer	15	„Adam”	90-280
1996	S.A. Tishkoff	1600	Wy z Af.	102-217
1997	M. Krings	2051	„Ewa” rozgałęzienie <i>sapiens sapiens</i> / <i>neandertalsis</i>	120-150 555-690

Grupie M. Kringsa udało się odtworzyć sekwencję (397 par nukleotydów) mitochondrialnego DNA Neandertalczyka sprzed 40 tys. lat. Porównywano ją z 2051 sekwencjami ludzkimi i 59 szympansimi. Badaną zmienną była liczba różnic (najczęściej zamiana piramidyn lub puryn) między

dwoma sekwencjami. A oto uzyskane średnie różnice:	
człowiek - człowiek	8.0
człowiek z Afryki - Neandertalczyk	27.1
człowiek z Europy - Neandertalczyk	28.2
człowiek-szympan	55.0

Wynik ten jest mocnym potwierdzeniem hipotezy wyjścia *homo sapiens sapiens* z Afryki. Gdyby pochodził on od Neandertalczyka, Europejczyk powinien by być znacznie bliższy Neandertalczycowi niż Afrykańczyk. Podsumowując wszystkie rezultaty jako najbardziej prawdopodobny rysuje się następujący scenariusz (daty w tys. lat temu):

- ok. 2000 Wyodrębnienie się *homo erectus* w Afryce
- 1600-800 *Homo erectus* przenosi się na inne kontynenty
- 500-200 *Homo erectus* przekształca się stopniowo w archaicznego *homo sapiens*
- 130-100 *Homo sapiens* w basenie Morza Śródziemnego daje początek Neandertalczycowi, który opanowuje Europę i Bliski Wschód
- 150-120 *Homo sapiens* w Afryce daje początek *homo sapiens sapiens*
- 110-90 *Homo sapiens sapiens* pojawia się na Bliskim Wschodzie
- ok. 35 *Homo sapiens sapiens* gwałtownie opanowuje całą Europę, wypierając Neandertalczyka; eksplozja kulturalna *Cro Magnon*

To co stało się 30-40 tys. lat temu bez cienia przesady można nazwać eksplozją kulturalną. Wprawdzie już na długo przedtem *homo sapiens sapiens* posługiwał się narzędziami, ale nigdy nie były one specjalnie zdobione. Natomiast począwszy od wieku ok. 35 tys. znajdujemy mnóstwo bogato zdobionych narzędzi, rzeźb i malowideł na ścianach jaskiń (zob. fot. na okładce). W Europie odkryto już ponad 200 jaskiń z malowidłami. Co roku odkrywane są nowe. Żadna z nich jednak nie przekracza magicznej granicy 35 000 lat. Dlaczego *homo sapiens sapiens*, genetycznie i anatomicznie niemal identyczny z nami, od 120 do 35 tys. lat temu nie rozwinął żadnej kultury? Co się wydarzyło 35 000 lat temu? Dlaczego *Cro Magnon* nagle tak bardzo się rozprzestrzenił i całkowicie wyparł Neandertalczyka? Dlaczego zaczął zdobić narzędzia, rzeźbić, malować na ścianach jaskiń? Wydaje się, że dlatego iż rozwinął język, zaczął używać symboli, myśleć abstrakcyjnie. Ale dlaczego nastąpiło to tak nagle i dlaczego dopiero 35 000 lat temu, a nie np. 80 000 lat wcześniej?

A może istnieją dawniejsze malowidła i rzeźby, które czekają na odkrycie? Albo pomyliliśmy się w datowaniu pierwszych *homo sapiens sapiens* lub przegapiliśmy istotne różnice anatomiczne czy genetyczne? To wszystko mało prawdopodobne, ale nie wykluczone. Odpowiedź może przybliżyć jedynie cierpliwe poszukiwanie i dalsze doskonalenie metod fizycznych i genetycznych.

Grzegorz Wrochna