

Mierzenie czasu wymaga wzorca – jakiegoś równomiernie przebiegającego zjawiska. Dzisiaj wykorzystujemy w tym celu drgania pobudzonych atomów cezu, co wymaga sporych umiejętności i odpowiedniej aparatury. Już od tysięcy lat człowiek odczuwał potrzebę mierzenia czasu i wykorzystywał w tym celu różne zjawiska, które lepiej lub gorzej spełniały warunek równomiernego przebiegu. Niewątpliwie do najwcześniej obserwowanych takich zjawisk należą ruch ciał niebieskich, a szczególnie Słońca, które względem Ziemi porusza się dość równomiernie, to znaczy z prędkością kątową w niezłym przybliżeniu stałą. Korzystając z tego, ludzie od tysiącleci konstruują zegary słoneczne. Spróbujmy się przyjrzeć, jak te zegary działają, a może i taki zegar zbudować.

## Ruch dobowy Słońca

Jak wiemy od czasów Kopernika, Ziemia wiruje wokół własnej osi, wykonując jeden obrót na dobę. Załóżmy, że stwierdzenie to jest prawdziwe w układzie odniesienia związanym ze Słońcem, co odpowiada rozumieniu doby jako *doby słonecznej*. Wobec tego w naszym, ziemskim układzie odniesienia ruch Słońca odbywa się wokół osi ziemskiej, jak na rysunku 1. Na rysunku tym nie ma Ziemi, za to umieszczono wzdłuż osi ziemskiej pręt. Ten pręt jest typowym elementem zegara słonecznego, a jego cień stanowi wskazówkę tego zegara, która krąży dookoła pręta, wykonując pełny obrót w ciągu doby. (W praktyce dogodniej nazywać wskazówką sam pręt, a nie jego cień, i taką konwencję odtąd przyjmujemy.) Na płaszczyźnie prostopadłej do osi ziemskiej można więc narysować okrąg, a na nim w równych odstępach zaznaczyć kolejne godziny, które będzie wskazywał cień. Oczywiście, o godzinie 12 cień będzie wskazywał południe. Wszystko to przedstawia rysunek 2.

W ten sposób otrzymaliśmy najprostszą wersję zegara słonecznego, czyli

## Zegar równikowy

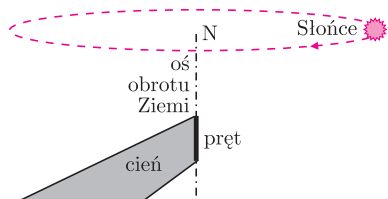
Jego konstrukcja jest najprostszą, ale ma jedną wadę: płaszczyzna równikowa nie jest pozioma, chyba że umiemy nasz zegar na biegunie. Jeżeli jednak chcemy wykorzystać ten zegar w Polsce, musimy pochylić jego oś w stronę północy (rys. 3), tak żeby tworzyła z płaszczyzną poziomą kąt równy szerokości geograficznej, która, na przykład, w Warszawie wynosi  $\Phi \approx 52^\circ$ . Wtedy oś zegara będzie równoległa do osi ziemskiej.

Na rysunkach 1 i 2 Słońce znajduje się na pewnej wysokości (kątowej) nad płaszczyzną równika. Jaka jest ta wysokość w rzeczywistości i od czego zależy? Żeby odpowiedzieć na to pytanie, musimy przyjrzeć się dokładniej względnemu ruchowi Słońca i Ziemi.

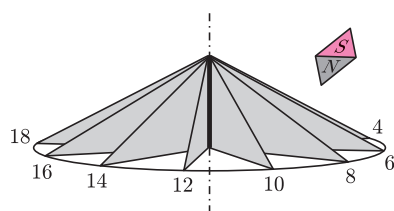
## Roczny ruch Ziemi wokół Słońca

Tym razem wróćmy do układu odniesienia wybranego przez Kopernika i zobaczmy na rysunku 4, jak wygląda ruch Ziemi po jej orbicie, którą w przybliżeniu uznamy za okrąg (całkiem spory, o promieniu około 150 milionów kilometrów).

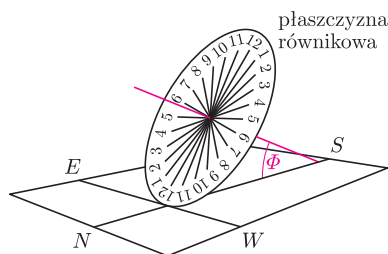
Definiuje się także *dobę gwiazdową*, co odpowiada przyjęciu jako układu odniesienia gwiazd stałych. Różnica między nimi (około czterech minut) wynika z rocznego ruchu Ziemi dookoła Słońca.



Rys. 1. Dzienny ruch Słońca wokół osi ziemskiej i cień rzucany przez pręt ustawiony wzdłuż tej osi.

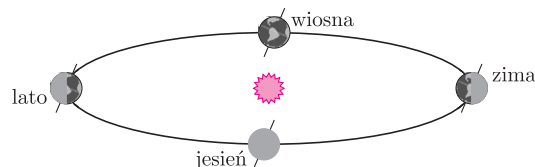


Rys. 2. Dzienny ruch cienia pręta-wskazówki zegara słonecznego (w lecie – Słońce powyżej płaszczyzny równika).



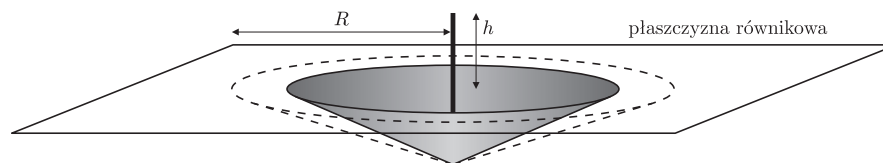
Rys. 3. Ustawienie zegara równikowego.

Ujemnym kątem odpowiada odwrócenie stożka wierzchołkiem w dół, czyli oświetlenie płaszczyzny równikowej od strony przeciwnej – południowej.



Rys. 4. Ruch Ziemi po orbicie wokół Słońca.

Widać, że Słońce raz znajduje się powyżej (od strony północy), a raz poniżej (od południa) płaszczyzny równika. Maksymalny kąt, jaki promienie słoneczne tworzą z płaszczyzną równika, jest kątem nachylenia  $\epsilon$  płaszczyzny równika do płaszczyzny orbity ziemskiej, i wynosi około  $23^\circ$ . Kąt ten jest równy szerokości geograficznej zwrotników, które, jak wiadomo, ograniczają obszar wokół równika, w którym Słońce może pojawić się w zenicie. To wszystko można wyczytać z rysunku 4. Wróćmy na chwilę do rysunku 2. Widać na nim, że cień górnego końca wskazówki zakreśla powierzchnię (boczną) stożka. W świetle powyższych wyjaśnień łatwo zauważyć, że tworząca tego stożka jest ustawiona do płaszczyzny równikowej pod kątem, który zmienia się w ciągu roku między  $-23^\circ$  a  $23^\circ$ .

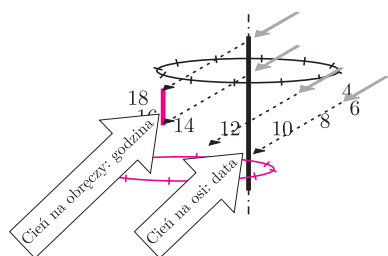


Rys. 5. Stożek cienia dolnego końca wskazówki w dniu przesilenia zimowego. Linia przerywana – miesiąc wcześniej lub później.

\*Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

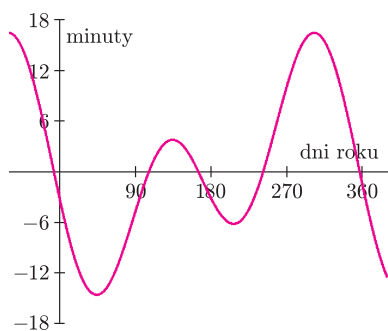


Rys. 6. Zegar równikowy (użyteczny tylko w lecie), wykonany przez firmę Neolit.



Rys. 7. Idea zegara równikowego z dwiema skalami: godzina na pierścieniu i data na przęcie.

W ogólności przekrój stożka może mieć kształt elipsy, paraboli lub hiperboli. Ten ostatni przypadek zachodzi, gdy płaszczyzna jest nachylona do podstawy stożka o kąt  $\alpha$  większy od kąta  $\Phi$  między tworzącą stożka a jego podstawą. Warunek ten jest spełniony w Polsce, gdyż dla skali pionowej umieszczonej na ścianie południowej kąt  $\alpha$  jest równy szerokości geograficznej, a dla poziomej jest on dopełnieniem szerokości geograficznej do kąta prostego (w Warszawie  $52^\circ$  i  $38^\circ$ ), podczas gdy kąt  $\Phi$  jest zawsze mniejszy od szerokości geograficznej zwrotnika ( $23^\circ$ ).



Rys. 8. Wykres równania czasu – poprawki, którą należy odjąć od odczytu zegara słonecznego.

Pozostawiam Czytelnikowi wykazanie, że promień  $R$  okręgu reprezentującego dzień, w którym Ziemia zakreśliła w swoim ruchu rocznym dookoła Słońca (liczonym od przesilenia zimowego lub letniego) kąt  $\varphi$ , jest powiązany z (liczoną od płaszczyzny tarczy) długością  $h$  wskazówki zależnością

$$(*) \quad R = h \operatorname{tg} \varepsilon / \cos^2 \varphi.$$

Fakt ten możemy wykorzystać do narysowania na tarczy zegara okręgów reprezentujących różne daty (patrz okładka), z wyjątkiem, oczywiście, dni równonocy, kiedy Słońce znajduje się w płaszczyźnie równika, a więc stożek redukuje się do płaszczyzny.

W praktyce jednak najczęściej się tego nie robi, ponieważ skończony promień tarczy zegara wyklucza pewne zakresy dat wokół dni równonocy. Widać także, że zegar równikowy z nieprzezroczystą tarczą, na której skala jest naniesiona tylko z jednej strony (rys. 6), jest użyteczny tylko przez pół roku, kiedy Słońce znajduje się po odpowiedniej stronie tarczy.

Rozwiązaniem, które nie ma tej wady, jest zastąpienie tarczy pierścieniem, na którego wewnętrznej powierzchni naniesiono skalę godzinową.

Przy okazji można teraz wrócić do idei połączenia zegara z kalendarzem. Jeżeli pierścień jest pełny, to będzie on rzucał cień na wskazówkę, i to w miejscu określonym przez wysokość Słońca nad płaszczyznę równikową, która, jak wiemy, zmienia się w cyklu rocznym. Możemy więc zaznaczyć na przęcie wskazówki skalę dat (dzień i miesiąc), co schematycznie przedstawia rysunek 7.

Skala dat takiego zegara nie jest wprawdzie jednoznaczna (każdemu położeniu cienia pierścienia na przęcie – poza skrajnymi – odpowiadają dwie daty w roku), ale jest to problem każdego zegara słonecznego i musimy się z nim pogodzić. Aby wyskalować kalendarz, możemy posłużyć się wzorem (\*), w którym  $h$  ma tym razem znaczenie wysokości znaku daty na skali przy ustalonym promieniu  $R$  pierścienia i jest dodatnie latem, a ujemne zimą.

### Inne typy zegarów słonecznych

Zegar równikowy nie jest bynajmniej najpopularniejszym zegarem słonecznym. Znacznie wygodniej jest posługiwać się skalą nie ukośną, ale poziomą lub pionową. Inaczej mówiąc, będziemy musieli stożek z rysunku 2 przeciąć płaszczyzną poziomą lub pionową, a więc w stosunku do osi stożka (równoległej do osi ziemskiej) ukośną. Płaszczyzny określone przez cień wskazówki przetną się z taką skalą wzdłuż prostych, a więc linie reprezentujące kolejne godziny będą nadal proste (choć nie będą już równomiernie rozmieszczone). Jednak linie reprezentujące różne daty nie będą teraz, jak dla zegara równikowego, okręgami, ale jako wynik przecięcia powierzchni stożka ukośną płaszczyzną będą miały kształt hiperbol. Wykreślenie tych hiperbol (znów okładka) nie jest już tak proste, jak narysowanie okręgów o wyliczonych promieniach, proponuję więc skorzystać w tym celu z oprogramowania dostępnego w Internecie, na przykład zaglądając na stronę <http://www.sundials.co.uk/comprogs.htm>

### Jak dokładny jest zegar słoneczny?

Oprócz oczywistych czynników wpływających na dokładność takiego zegara, jak staranność wykonania i ustawienia, czy nieostrość cienia, warto zwrócić uwagę na dwa źródła błędów systematycznych. Pierwsze z nich to różnica między czasem oficjalnym, ustalonym administracyjnie dla określonego obszaru geograficznego, a czasem lokalnym, zmieniającym się z długością geograficzną. Tę różnicę najłatwiej uwzględnić dla zegara równikowego, obracając jego tarczę wokół osi wskazówki o odpowiedni kąt, który można wyznaczyć empirycznie przez porównanie z zegarem wskazującym czas oficjalny. Dla zegara pionowego lub poziomego należy wprowadzić odpowiednią poprawkę (cztery minuty na stopień długości geograficznej) do programu obliczającego skalę. Drugim źródłem błędów systematycznych są przybliżenia, które przyjęliśmy, rozpoczynając nasze rozważania. A więc przede wszystkim kołowy kształt orbity ziemskiej. W rzeczywistości ma ona kształt spłaszczonej elipsy. Z tego powodu prędkość kątowna Ziemi na orbicie zmienia się w czasie zgodnie z prawem zachowania pędu: jest największa, gdy Ziemia jest najbliżej Słońca. Prędkości kątowe ruchu orbitalnego i wirowego Ziemi dodają się, i to wektorowo, ponieważ odbywają się wokół różnych osi. Z tego powodu „czas” odmierzany przez zegar słoneczny nie biegnie równomiernie, ale czasem szybciej, czasem wolniej, zależnie od pory roku. Wynikająca stąd niedokładność zegara słonecznego jest całkiem spora – może dochodzić do kwadransa. Poprawka, którą należy uwzględnić, aby od odczytu zegara słonecznego przejść do dokładnego czasu, jest określona przez tzw. równanie czasu, które w formie wykresu (rys. 8) umieszcza się czasem dla wygody na samym zegarze słonecznym.