



Krótką historia pomiaru czasu, czyli od zegara słonecznego do zegara atomowego¹

Jarosław Koperski

Instytut Fizyki UJ

Streszczenie

Przełom tysiącleci może skłaniać każdego z nas do refleksji nad upływającym *czasem*. Artykuł pokazuje inwencję rodzaju ludzkiego w dziedzinie mierzenia tej wielkości fizycznej. Począwszy od zegarów słonecznych, starożytnych zegarów wodnych, przez zegary mechaniczne, zegary kwarcowe, aż po zegary atomowe – wszystkie przytaczane przykłady są efektem niezwykłej pasji człowieka w dążeniu do jak największej precyzji pomiaru.

... czym zatem jest czas?

Gdy nikt mnie o to nie pyta, wiem czym czas jest;

gdy zaś chcę pytającemu wytłumaczyć – gubię się...

Św. Augustyn, ok. 400 r. n.e.

Wprowadzenie

Przełom tysiącleci daje fizykwowi okazję do prześledzenia sposobów, jakich używał człowiek do mierzenia *czasu*. Do sposobów tych zaliczają się zarówno te najprostsze, wykorzystujące np. ruch Słońca po nieboskłonie, jak i te bardzo złożone, których zastosowanie wymagało rozwoju wiedzy, głębokiego poznania i wykorzystania zjawisk mikroświata.

Pytanie, które pojawia się na wstępie: „co to jest czas?”², jest oczywiste.

Czas możemy zdefiniować jako porządek wydarzeń lub jako jeden z elementów czterowymiarowej geometrii czasoprzestrzeni. Inna definicja określa *czas* jako wielkość mierzona przez zegar³. Bezsporne jest, że *czas* jest *wielkością fizycz-*

¹ Na podstawie wykładu habilitacyjnego wygłoszonego pod tym samym tytułem dnia 7 marca 2002 roku.

² Słownik języka polskiego pod redakcją M. Szymczaka (PWN, Warszawa 1978) podaje definicję: „czas to nieprzerwany ciąg chwil, trwania; jest jedną z podstawowych (obok przestrzeni) form bytu materii”. Pojęcie czasu absolutnego wprowadził Sir Isaac Newton, czasu względnego Albert Einstein, a czas urojony pojawił się w teorii Stephena Hawkinga.

³ Słowo *zegar*, określające miernik czasu, pojawiło się dopiero w XIV wieku n.e. Początkowo słowo to oznaczało *dzwon*, jako że pierwsze zegary mechaniczne instalowano w owym czasie na dzwonicach kościołów.

na, więc może być mierzony i, jak się okaże, może być mierzony z bardzo dużą dokładnością.

Pomiar czasu t jest procesem bardzo prostym i sprowadza się do kilku podstawowych czynności. Zaczynamy mierzyć czas od pewnej chwili początkowej t_0 . Następnie wielokrotnie mierzymy ustalony przez nas elementarny interwał czasowy Δt , sumujemy wyniki pomiarów wszystkich Δt i dodajemy do ustalonej wcześniej chwili początkowej t_0 . Taki sposób pomiaru narzuca nam wymogi na miernik czasu, który musi posiadać niezbędne elementy. Podstawową sprawą jest dysponowanie powtarzalnym procesem zaznaczania równych przedziałów czasowych Δt . Kolejne elementy to: sposób liczenia przedziałów czasowych Δt oraz sposób pokazywania wyniku końcowego.

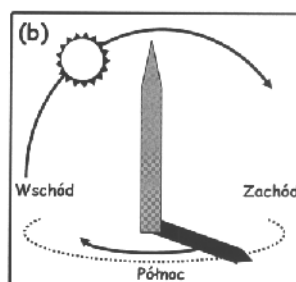
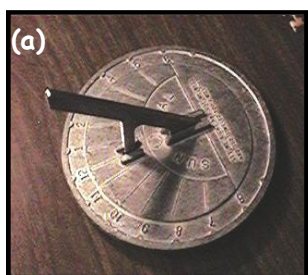
Dzieje mierzenia czasu to trzy główne epoki: epoka przepływu ciągłego, trwająca do ok. 1360 roku, kiedy to wynaleziono mechanizm wychwytowy, następnie epoka kontroli nierezonansowej, która zakończyła się w 1656 roku skonstruowaniem pierwszego zegara wahadłowego, oraz epoka kontroli rezonansowej, trwająca do dziś, a naznaczona w 1927 roku skonstruowaniem zegara kwarcowego oraz uruchomieniem zegara atomowego w roku 1955.

Jednak wcześniej, długo przed epoką przepływu ciągłego, używano zegarów słonecznych.

Zegary słoneczne

Zegary słoneczne, zwane gnomonami, wykorzystywały cykliczny proces „wędrówki” Słońca po nieboskłonie ze wschodu na zachód, będący konsekwencją dobowego obrotu Ziemi dookoła własnej osi.

Podczas gdy Słońce „wędrowało” po niebie, długość i pozycja cienia rzucanego przez wbity w ziemię pionowy słup wyznaczały porę dnia. Na półkuli północnej cień przesunął się zgodnie ze znanym dziś ruchem wskazówek zegara z zachodu na wschód (patrz rys. 1). Na półkuli południowej cień przesunął się w kierunku przeciwnym.



Rys. 1. (a) Przenośny zegar słoneczny. Pozycja i długość cienia oznaczały porę dnia. (b) Ilustracja działania zegara słonecznego na półkuli północnej

Niestety, zegary słoneczne pokazywały tylko słoneczny czas lokalny. Ich dokładność była bardzo ograniczona. Nie uwzględniały rocznej zmiany nachylenia osi obrotu Ziemi względem płaszczyzny orbity Ziemi wokół Słońca. Jednak ich podstawową wadą było to, że działały tylko w obecności Słońca. Pojawiło się pytanie: jak mierzyć czas w nocy?

Epoka przepływu ciągłego

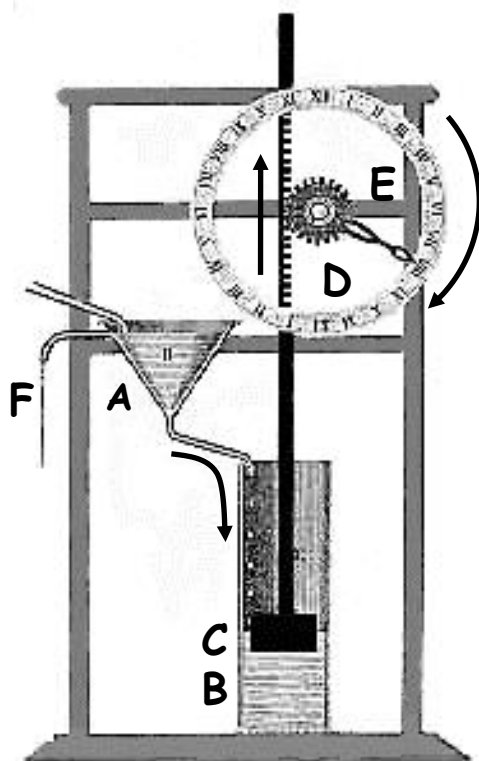
Zapoczątkowało ją pojawienie się urządzeń, w których upływający czas wyznaczała stała i ciągła przepływ substancji ciekłej lub sypkiej. Jednymi z pierwszych urządzeń tego typu były wodne klepsydry⁴. Początek ich używania był wielkim postępek, jako że stało się możliwe mierzenie czasu również pod nieobecność Słońca.

W przypadku klepsydr wodnych procesem cyklicznym, potrzebnym do wyznaczenia interwałów Δt , było przelewanie się określonej ilości wody pomiędzy dwoma zbiornikami: górnym i dolnym. Naturalne było, i zauważyli to pierwsi użytkownicy, że w miarę ubywania wody, czyli w miarę zmniejszania się masy i wysokości słupa wody w górnym zbiorniku, malało ciśnienie słupa wody w miejscu, gdzie znajdował się otwór pomiędzy zbiornikami. Powodowało to nieregularności w pracy klepsydr. Rozwiązanie przedstawione na rys. 2 pokazuje jeden ze sposobów stosowanych w celu ominięcia tego problemu.

Niestety, klepsydry wodne nie były miernikami dokładnymi. Ich główną wadą były niekontrolowane ubytki wody (powodujące ich „przyspieszanie”) oraz nieregularności sezonowe, takie jak zmiany temperatury, wilgotności itp.

Jak nietrudno się domyślić, częściowym ominięciem tych problemów było zastosowanie klepsydr „piaskowych”⁴. W zegarach tych materiałem sypkim był proszek cynowy, ołowiowy lub po prostu piasek. Proces odmierzania stałych przedziałów Δt pozostał podobny jak w klepsydrach wodnych. Zegary piaskowe nie były jednak dokładniejsze. Problemem powodującym ich złe działanie było tarcie działające pomiędzy przesypanych ziarenkami, powodujące zmniejszanie się ich średnicy i, w konsekwencji, szybsze przemieszczanie się materiału sypkiego przez otwór. Powodowało to „przyspieszanie” zegara. Szukano zatem innych rozwiązań.

⁴ Nazwa *klepsydra* pochodzi od dwóch greckich słów: *kléptō* (kradnę) oraz *hýdōr* (woda) i jest nieściśle przypisywana tylko przepływowym zegarom piaskowym, które pojawiły się dopiero w średniowieczu.



Rys. 2. Zaawansowana konstrukcja klepsydry wodnej z III wieku p.n.e. Z naczynia górnego A w kształcie lejka do naczynia dolnego B wpływała woda ze stałą prędkością. Podnoszący się poziom wody w naczyniu B powodował wypychanie pływaka C połączonego z zębatką D, która unosząc się, powodowała obrót wskazówki godzinnej E. Nadmiar wody z lejka odprowadzany był na zewnątrz F, co zapewniało stałą wysokość słupa wody w naczyniu A

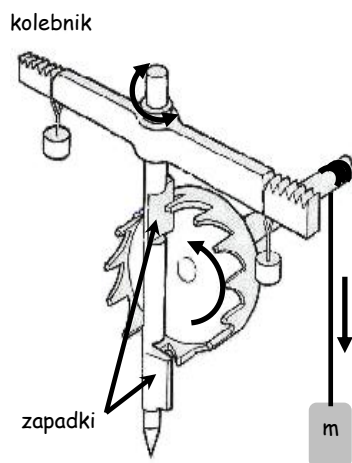
Epoka kontroli nierezonansowej

Przełomowym krokiem w rozwoju mierników czasu było zastąpienie wody lub materiału sypkiego bądź to *odważnikiem* o odpowiedniej masie (tu procesem cyklicznym było uwalnianie energii potencjalnej odważnika w polu grawitacyjnym), bądź też nawiniętą lub ściśniętą *sprężyną* (tu procesem cyklicznym było uwalnianie energii sprężystości sprężyny).

Epokę przepływu ciągłego zakończyło wynalezienie mechanizmu pozwalającego na pełną kontrolę procesów uwalniania energii odważnika lub sprężyny. Miało to miejsce ok. 1360 roku i było dziełem Henry de Vicka, pracującego dla króla Francji Karola V. Dało to początek epoce *kontroli nierezonansowej*.

Fakt konstrukcji i zastosowania tego mechanizmu, zwanego ZAPADKOWYM MECHANIZMEM WYCHWYTOWYM był, niezwykle doniosły – oto po raz pierwszy do kontroli miernika czasu użyty został ruch drgający!

Mechanizm wychwytowy pozwalał na precyzyjną regulację prędkości uwalniania energii odważnika (patrz rys. 3). Osiągnięto wówczas cel: dokładność pracy zegara z zapadkowym mechanizmem wychwytowym była zdecydowanie większa od dokładności klepsydr wodnych czy klepsydr z materiałem sypkim.



Rys. 3. Zapadkowy mechanizm wychwytowy. Składał się z koła koronowego, do osi którego przyczepiony był odważnik. Ruch koła koronowego regulowany był za pomocą dwóch zapadek umieszczonych na osi oscylującego kolebника

Epoka kontroli rezonansowej

Zegary wahadłowe

Epoka kontroli nierezonansowej trwała do końca XVI wieku. Wtedy to pojawiło się WAHADŁO – stabilny oscylator mechaniczny.

Przełom zapoczątkowały studia Galileusza nad grawitacyjnym wahadłem prostym. Około roku 1583 Galileusz odkrył, że okres wahadła prostego zależy tylko od jego długości i nie zależy od amplitudy (tzw. izochronizm)⁵. Niestety, Galileusz nie wykorzystał wahadła jako elementu oscylującego w zegarze, podał jednak przepis, jak to zrobić.

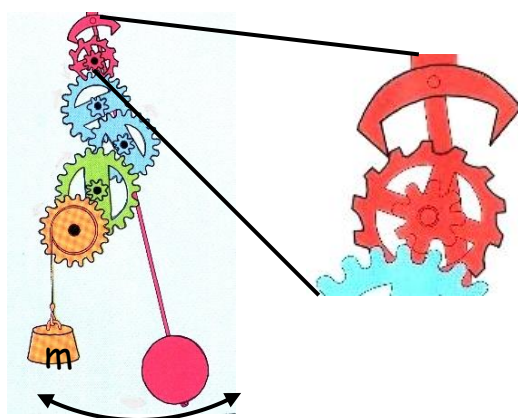
Z przepisu tego skorzystał Christiaan Huygens, duński astronom i matematyk, który w 1656 roku skonstruował pierwszy zegar wahadłowy. Wydarzenie to za-

⁵ Wniosek ten Galileusz wysnuł, obserwując wahania lampy wiszącej w katedrze w Pizie.

początkowało kolejną epokę w rozwoju mierników czasu – epokę kontroli periodycznej, zwanej rezonansową⁶.

W konstrukcji zegara wahadłowego rolę kolebnika przejęło oscylujące wahadło, które zakończone było *kotwicowym mechanizmem wychwytowym*, uwalniającym, w rytm ruchów wahadła, pojedyncze zęby koła mechanizmu. Całość napędzana była energią potencjalną odważnika (patrz rys. 4).

Dokładność zegarów wahadłowych zdecydowanie przewyższyła zegary z mechanizmem zapadkowym i kolebnikiem, a jedną z donioślejszych korzyści z zastosowania przekładni zębatych było wprowadzenie używanych do dziś wskazówek minutowej i sekundowej.



Rys. 4. Kotwicowy mechanizm wychwytowy

Jest oczywiste, że dla precyzyjnego ustalenia okresu drgań wahadła T ($T \approx 2\pi\sqrt{\ell/g}$) konieczny był precyzyjny dobór jego długości ℓ oraz stabilizacja podczas pracy. Czy wiecie, że nawet bardzo mała zmiana ℓ , np. o 2 mm, spowodowana np. wzrostem temperatury otoczenia o 2°C , prowadziła do spowolnienia zegara o 1 sekundę na dobę? Na wiele lat problem stabilizacji ℓ stał się wielkim wyzwaniem dla konstruktorów zegarów wahadłowych.

Pod koniec XIX wieku zegary wahadłowe osiągnęły stabilność pracy ok. 0,01 sekundy na dobę i stały się wyposażeniem obserwatoriów astronomicznych. Były najdokładniejszymi miernikami czasu, aż do pierwszej połowy XX wieku.

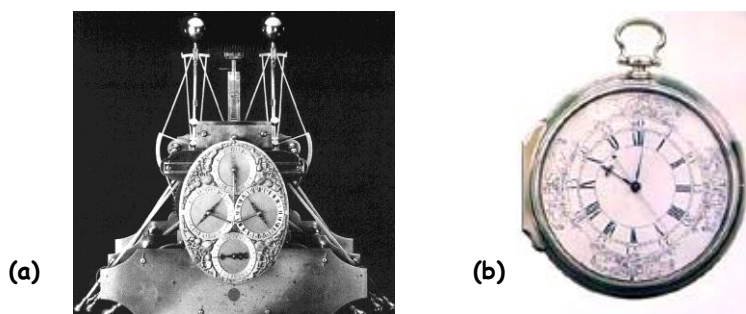
⁶ Również zasługą Huygensa było skonstruowanie zegara, w którym zamiast wahadła zastosował koło balansowe ze spiralną sprężyną. Rozwiązanie to stosuje się do dnia dzisiejszego.

Chronometry

A teraz słów kilka o chronometrach⁷.

W pierwszej połowie XVIII wieku zaistniała konieczność udoskonalenia metody pomiaru długości geograficznej. Pomyłki nawigacyjne podczas podróży morskich, powodowane błędami jej wyznaczania, prowadziły do wielu tragedii. Konkursy ogłaszane przez władców Hiszpanii, Portugalii i Królestwa Brytanii zachęcały wynalazców, którzy dążyli do skonstruowania chronometrów na tyle dokładnych, aby ich zastosowanie na morzu, w warunkach dużych zmian temperatury, ciśnienia i wilgotności, umożliwiło wyznaczanie długości geograficznej z pożądaną dokładnością⁸.

Jednym z tych, którzy stanęli do konkursu, był John Harrison, syn cieśli, zegarmistrz, rzemieślnik z Yorkshire w Anglii. Harrison zrezygnował z metod pozwalających na stabilizację ℓ . Skupił się na konstrukcji elementu oscylującego zbudowanego z materiałów o małych współczynnikach rozszerzalności termicznej, niezawodnego mechanizmu wychwytowego oraz na udoskonaleniu łożysk, czyli minimalizacji sił tarcia. Zbudował cztery modele chronometrów. Dopiero ostatni model (patrz rys. 5(b)), powstały 26 lat po przystąpieniu do konkursu, charakteryzujący się zmienioną koncepcją (miniaturyzacja), posiadał żądaną dokładność i wytrzymałość na zmienne warunki podróży morskich. Pozwalał na wyznaczanie długości geograficznej z dokładnością do 0,5 stopnia! Przewyższało to narzucane konkursem wymagania.



Rys. 5. Chronometry Harrisona: (a) ważący 33 kg model H.1. z 1735 roku oraz (b) model H.4. z 1761 roku mający średnicę 13 cm. Modelem H.4, który wyglądał jak duży zegarek kieszonkowy, Harrison wygrał konkurs i zdobył nagrodę w wysokości 10 tysięcy funtów (równoważną obecnie kilku milionom dolarów)

⁷ Nazwa pochodzi od greckich słów *chrónos* – czas i *metrêd* – mierzyć. Był to przenośny zegar o dużej dokładności, stosowany m.in. w nawigacji.

⁸ Zasada wyznaczania długości geograficznej z pomiaru czasu opiera się na porównaniu wskazania chronometru umieszczonego na pływającym statku z czasem, w którym statek opuścił port (1 godz. := 15° długości geogr.).

Zegary elektryczne

Jak zauważyliśmy, okres wahadła zależy nie tylko od ℓ , ale również od przyspieszenia ziemskiego g . Pod koniec XIX wieku stabilność zegarów wahadłowych (ok. 0,01–0,001 sekundy na dobę) zaczynała graniczyć z tą, dla której wpływ zmian g z kształtem Ziemi miał już znaczenie. Naturalnym dążeniem było zatem uniezależnienie się od wpływu g .

Jednym ze sposobów było wykorzystanie *drgań prądu zmiennego*. Częstością podstawową była częstość 50 Hz ze źródła prądu zmiennego. Przez odpowiednią obróbkę w układach elektronicznych zapewniano generację częstości 1 Hz, będącej podstawą dla wskaźnika sekundowego. Później wskazówki zamieniono na wyświetlacze cyfrowe, ciekłokrystaliczne lub diody emitujące światło.

Zegary kwarcowe

Inną możliwość uniezależnienia się od wpływu g na element oscylujący otworzyła seria wynalazków związanych ze zjawiskiem piezoelektrycznym⁹, odkrytym w roku 1880 przez braci Pierre'a i Paul-Jacques'a Curie. Dało to początek tzw. generatorom kwarcowym.

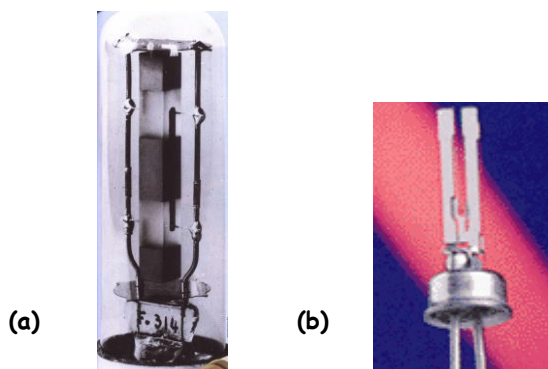
Generator kwarcowy (patrz rys. 6(a)) został użyty do konstrukcji tzw. ZEGARA KWARCOWEGO. Jak łatwo się domyślić, teraz procesem odpowiedzialnym za odmierzanie równych przedziałów Δt stały się oscylacje kryształu. Zalet płynących z takiego rozwiązania było wiele: kwarc był piezoelektrykiem, miał własności niezależne od temperatury, był stabilny mechanicznie i chemicznie, był też powszechny w przyrodzie oraz łatwy do hodowania.

Pierwszy zegar kwarcowy zbudowali w 1927 roku Warren Marrison i Joseph Horton. Należy zaznaczyć, że jako standardy czasu zegary kwarcowe natychmiast wyparły zegary wahadłowe i w latach czterdziestych XX wieku zamieniły je w większości obserwatoriów astronomicznych. Ich stabilność pracy przewyższyła o dwa rzędy wielkości stabilność pracy najprecyzyjniejszych zegarów wahadłowych.

W roku 1970 pojawiły się pierwsze powszechnie dostępne zegarki kwarcowe na rękę. Użyto w nich kwarcowego generatora pokazanego na rys. 6(b).

Niestety, oscylator kwarcowy nie był doskonały, „zużywał się”. Na skutek warunków zewnętrznych mógł zmieniać swoje własności i powodować nieregularności w pracy zegara kwarcowego.

⁹ Sprzężenie własności mechanicznych i elektrycznych w odpowiednio wyciętym kryształku kwarcu. Na powierzchni kryształu kwarcu poddanego działaniu nacisku mechanicznego pojawia się ładunek elektryczny. Ten sam kryształ umieszczony w odpowiednim obwodzie elektrycznym wibruje i generuje sygnał elektryczny o stałej częstości.



Rys. 6. (a) Jeden z pierwszych generatorów z użyciem kryształu kwarcowego. (b) Kwarcowy generator stroikowy stosowany w zegarkach na rękę

Zegary atomowe

Obecnie obowiązujące wzorce czasu oparte są na ZEGARACH ATOMOWYCH. Są one wynikiem maksymalnego uniezależnienia się od własności oscylatora stosowanego do generacji interwałów Δt . Przejście pomiędzy dwoma poziomami energetycznymi w atomie oferuje taką niezależność. Jest ona oczywista: przejście energetyczne nie „zużywa się”, w każdych warunkach jest takie samo.

W 1955 roku powstał pierwszy zegar atomowy pracujący z wykorzystaniem rezonansowego przejścia w atomach cezu. Nazywał się Caesium I i został zbudowany przez Louisa Essena i Jacka Parry’ego z Narodowego Laboratorium Fizycznego w Anglii. Jednak zegar atomowy nie rezygnował z użycia rezonatora kwarcowego. Następowo w nim stałe *sprawdzanie* częstości oscylatora kwarcowego poprzez wykorzystanie precyzyjnych oscylacji atomowych pomiędzy dwoma poziomami energetycznymi.

Bardzo ogólnie rzecz ujmując, nie wdając się w szczegóły, zasada działania Caesium I przedstawia się następująco. W źródle produkowana jest wiązka atomów cezu w stanie podstawowym. Atomy posiadają strukturę nadsubtelną: dwa poziomy o różnych energiach odległe o około 9,2 GHz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$). Jest to tzw. *przejście zegarowe*¹⁰.

W obszarze poza źródłem, w obecności zewnętrznego pola magnetycznego B, następuje przestrzenna selekcja podpoziomów energetycznych zaangażowanych w

¹⁰ Obecnie obowiązującą jednostką czasu w układzie SI jest *sekunda*. Jej definicja została podana w 1967 roku na XIII Konferencji Wąg i Miar. Jest czasem trwania 9 192 631 770 okresów promieniowania, odpowiadającego przejściu pomiędzy dwoma poziomami struktury nadsubtelnej w stanie podstawowym cezu.

„przejście zegarowe”, a różniących się między sobą własnościami wynikającymi z oddziaływaniem z polem B. Podpoziomy o wyższej energii są eliminowane i tylko podpoziomy o niższej energii trafiają w obszar mikrofalowej wnęki rezonansowej¹¹, która może powodować przejścia do podpoziomu energii wyższej.

Za wnęką następuje kolejna przestrzenna selekcja podpoziomów i mierzy się ilość tych o wyższej energii. Następnie, w pętli sprzężenia zwrotnego, wynik pomiaru służy do poprawienia częstości oscylatora kwarcowego, który zasila wnękę rezonansową. Licznik elektroniczny przetwarza częstość oscylacji kryształu na interwały $\Delta t = 1$ s.

Burzliwy rozwój zegarów atomowych nastąpił w latach siedemdziesiątych XX wieku, kiedy to zastosowanie laserów spowodowało odejście od magnetycznych metod separacji atomów i zastosowanie *metod pompowania optycznego* (patrz *Foton 75*, 2001).

Stabilność pracy zegarów atomowych jest bardzo duża (1 sekunda na 6 milionów lat!). Jako standardy czasu wyparły one zegary kwarcowe. W latach 1993–99 oficjalnym standardem czasu był zegar NIST-7, zbudowany w Narodowym Instytucie Standardów i Technologii (NIST) w USA.

Niestety, i zegar atomowy nie jest miernikiem doskonałym. Jednym ze źródeł niedokładności zegara atomowego jest *efekt Dopplera* drugiego rzędu, którego wielkość jest proporcjonalna do kwadratu prędkości atomów. Wpływ tego efektu może być minimalizowany przez spowalnianie atomów np. przez tzw. *chłodzenie laserowe* (patrz *Foton 75*).

Fontanny atomowe

Do głównych czynników, jakie wpływają na dokładność D zegara atomowego, należą: Δv – szerokość „przejścia zegarowego” (duża dla przejść dozwolonych, mała dla przejść wzbronionych), v_{rez} – rezonansowa częstość tego przejścia, N – ilość atomów oddziałujących z polem promieniowania wnęki oraz τ – czas tego oddziaływania. Zależność ta wyraża się za pomocą formuły

$$D \approx \frac{\Delta v}{v_{rez}} \sqrt{\frac{1}{\tau N}}, \quad (1)$$

z której widać, że dokładność jest tym większa, im mniejsza jest Δv oraz im większe są v_{rez} , N oraz τ .

Zatem, po pierwsze, należało zwiększyć czas τ . Wynikiem była kolejna generacja zegarów atomowych – skonstruowanych z użyciem *fontann atomowych*. Przyjętym rozwiązaniem było połączenie pomysłu Jerrolda Zachariasia, który w roku 1953 zbudował pierwszą fontannę atomową, z techniką chłodzenia ato-

¹¹ Przejścia pomiędzy podpoziomami oddalonymi od siebie o 9,2 GHz odbywają się w obszarze mikrofal.

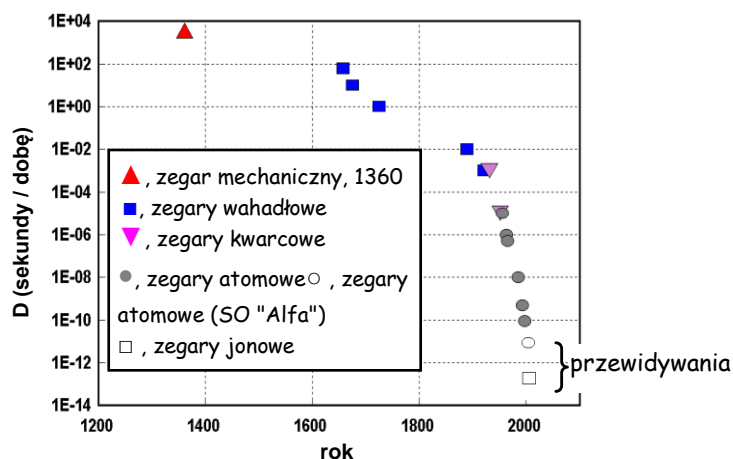
mów. W metodzie tej obniża się początkową prędkość atomów (poprzez chłodzenie laserowe jak największej ilości atomów N w pułapce magnetoptycznej), wytwarza fontannę, oraz wykorzystuje fakt, że atomy z relatywnie małą prędkością w okolicy punktu zwrotnego w fontannie dwukrotnie przebywają obszar oddziaływania z wnęką rezonansową.

Najdokładniejszy na świecie zegar z użyciem fontanny atomowej uruchomiono 1993 roku w Paryżu, w grupie André Clairona i Christopha Salomona. Stabilność pracy paryskiego zegara jest bezprecedensowa i wynosi 1 sekundę na 30 milionów lat! Od 1995 roku jest oficjalnym standardem czasu obok zegara na fontannie cezowej NIST F-1, działającego w NIST, w USA.

Zegary jonowe

Zgodnie z formułą (1), wzrost dokładności można też osiągnąć, zwiększając v_{rez} . W porównaniu z dotychczas omawianymi przejściami mikrofalowymi, wielce obiecujące jest zastosowanie *przejść optycznych* (częstości \sim THz, 1 THz = 10^{15} Hz). Spowoduje to wzrost v_{rez} o 6 rzędów wielkości!

Realizację z wykorzystaniem przejść optycznych przewiduje się dla *zegarów jonowych* (sposoby pułapkowania jonów są łatwiejsze od sposobów pułapkowania neutralnych atomów). Zakładana stabilność pracy jest absolutnie niewiarygodna: 1 s na 10 miliardów lat!



Rys. 7. Wielki postęp w dokładności pomiaru czasu: w 1360 roku stabilność pracy wynosiła 2 godziny na dobę, w roku 1995 – 1 sekundę na 30 mln lat (wzrost o 13 rzędów wielkości w ciągu 640 lat, w tym 6 rzędów wielkości przez ostatnie 45 lat). Przewidywania na najbliższe 5 lat (zegary atomowe na Stacji Orbitalnej „Alfa” i zegary jonowe na przejściach optycznych) są imponujące

Podsumowanie

Dynamika rozwoju mierników czasu może być zilustrowana postępowaniem w dokładności pomiaru czasu, który można wyrazić dopuszczalnym przez dany miernik błędem w sekundach na dobę (patrz rys. 7).

Trudno jest wyrokować na temat przyszłości mierników czasu. Czy w najbliższych latach nastąpi jakiś znaczący przełom na miarę tych sprzed kilkudziesięciu lat? Czy raczej będą kontynuowane obecne sposoby? Czas pokaże.



Zegar wahadłowy, szafkowy, wyk. Gobier, Paryż 1654 r. dla króla Jana Kazimierza
obudowa przerobiona w XVIII w.

Ekspонат z Muzeum im. Przypkowskich w Jędrzejowie <http://www.jedrzejow.home.pl>