

## Światło w służbie jednostek miar

### Light at the service of measurement units

Paweł Fotowicz (Główny Urząd Miar)

Światło odegrało istotną rolę w kształtowaniu się definicji i sposobu odtwarzania jednej z podstawowych jednostek miar SI, a mianowicie metra, gdy porzucono jego definicję w oparciu o wzorzec materialny. Redefinicje spowodowane były potrzebą zwiększenia dokładności odtwarzania jednostki miary.

The light played an important role in definition and reproducing one of the basic SI units, namely the metre, when the definition based on a material standard was abandoned. The redefinitions were caused by the need to increase the accuracy of the measurement unit reproduction.

**Słowa kluczowe:** metr, światło, jednostka miary.

**Keywords:** metre, light, measurement unit.

### Kariera światła

Kariera światła w dziedzinie miar zaczyna się wraz z eksperymentem Michelsona-Morleya, którego wynik został ogłoszony w 1887 roku. Mówi on, że prędkość światła jest stała i niezależna od szybkości jego źródła. Eksperyment został przeprowadzony w układzie interferometru Michelsona. Sam pomysłodawca tego układu optycznego, Albert Michelson, postanowił wykorzystać go do odtwarzania jednostki miary długości, czyli metra.

Urządzenie wykorzystuje zjawisko interferencji światła. Polega ono na nakładaniu się dwóch fal optycznych o tej samej długości, gdyż pochodzącej z tego samego źródła promieniowania. Wiązka emitowana przez to źródło jest rozdzielana na dwie równe części i odbijana powrotnie przez dwa zwierciadła, dzięki czemu mogą się spotkać fale o tej samej częstotliwości. Gdy jedno ze zwierciadeł zmienia swoje położenie, to jedna z fal przesuwa się względem drugiej, jak jedna sinusoida względem drugiej. W obrazie nazywanym prążkami interferencyjnymi powstają naprzemiennie strefy rozjaśnienia, gdy fale pokrywają się i ściemnienia, gdy fale są przesunięte o pół ich okresu. Przejście od strefy jasnej do ciemnej spowodowane jest przesunięciem jednego ze zwierciadeł o pół długości fali światła. Są to bardzo małe odległości, rzędu dziesiątek części mikrometra. Michelson zdawał sobie sprawę z jak precyzyjnym urządzeniem ma do czynienia i dlatego zaproponował wykorzystanie go do odtwarzania jednostki miary długości. W latach dziewięćdziesiątych XIX stulecia sprowadził ze Stanów Zjednoczonych Ameryki do Paryża, zbudowany przez siebie, interferometr i tam w laboratorium Międzynarodowego Biura

Miar, w latach 1892–1893, wykonywał porównania długości wzorca metra z wielokrotnością długości fali linii widmowej kadmu. Wynik porównań dał rezultat, że metr to 1 553 163,5 wielokrotności długości linii widmowej kadmu, której wartość wynosi  $\lambda_{\text{Cd}} = 643,847\,22 \text{ nm}$  [1]. Pozwoliło to na zwiększenie odtwarzalności metra stukrotnie, w stosunku do precyzji jego odtwarzania przez wzorzec materialny.

### Przełom w fizyce

Początek XX wieku przynosi przełom w fizyce, za sprawą teorii kwantów Maxa Plancka. Teoria ta zakłada, że każdej emisji promieniowania towarzyszy określona jej skończona porcja  $E$ , zależna od częstotliwości kwantu  $\nu$ :

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

gdzie  $h$  to stała kwantowa, zwana stałą Plancka.

Podejście Plancka wspierał Albert Einstein, tworząc teorię kwantową światła. Teoria ta zakłada m.in. że istnieje możliwość wyemitowania bliźniaczych, co do częstotliwości, kwantów, w procesie nazywanym emisją wymuszoną. Einstein kwanty o częstotliwościach z zakresu częstotliwości widma optycznego nazywa fotonami. Fotony emitowane są przy stałych przejściach pomiędzy dozwolonymi poziomami energetycznymi w atomie. Każdemu takiemu przejściu ze stanu wyższego energetycznie do niższego, zgodnie z zasadą zachowania energii, musi towarzyszyć emisja pojedynczego fotonu o częstotliwości wynikającej ze wzoru Plancka (1). Jeżeli atom zostanie odpowiednio wzbudzony energią zewnętrzną, to emisje odbywać się będą w postaci strumienia fotonów



o tej samej lub bardzo bliskiej częstotliwości. Zatem widmo promieniowania takiego strumienia optycznego będzie niezwykle wąskie. Oznacza to możliwość budowy interferometrów o dużych zakresach pomiarowych, jak i niezwykłej precyzji odtwarzania długości. Miarą tej precyzji jest bowiem szerokość linii widma promieniowania, im węższa tym mniejsza niepewność pomiaru. Niestety, Einstein nie doczekał się realizacji technicznej swojego teoretycznego pomysłu.

### Przełomowy laser

Laser pojawił się dopiero w latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia. Jego nazwa wywodzi się od słów *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, czyli wzmocnienie światła (generowanego) poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Urządzenie składa się z dwóch zespołów: emitującego światło i jego wzmacniacza. Wzmacniacz zbudowany jest z dwóch naprzeciwległych zwierciadeł, z których jedno jest częściowo przepuszczalne. Zwierciadła te tworzą rezonator, którego zadaniem jest wielokrotne poosiowe odbijanie fotonów emisji wymuszonej. Dzięki temu eliminowane są fotony, rozchodzące się w innych kierunkach niż poosiowy. Laser zatem emituje prostoliniową wiązkę promieniowania, ale co ważne z metrologicznego punktu widzenia, o bardzo wąskich liniach widmowych. Niestety jest ich na ogół wiele w widmie promieniowania. Ze zbioru tego należy wyizolować pojedynczą linię zwaną modelem podłużnym. Wykorzystuje się do tego celu specjalne materiały absorpcyjne, umożliwiające również stabilizację częstotliwości lasera.

Pierwsze lasery do zastosowań metrologicznych powstały już na początku lat sześćdziesiątych. Ośrodkiem czynnym, czyli tym, w którym zachodziła emisja wymuszona, była mieszanina gazów helu i neonu (He-Ne). Energia do ośrodka czynnego lasera dostarczana jest przy użyciu prądu wysokonapięciowego. Lasery takie powstawały w wielu ośrodkach naukowych, również w Polsce. Warto w tym miejscu wspomnieć o pierwszym laserze He-Ne, uruchomionym w 1963 roku, w pracowni prof. Zbigniewa Puzewicza z Wojskowej Akademii Technicznej. Ale prawdziwy przełom w tym względzie nastąpił w Stanach Zjednoczonych w JILA [2].

### Rola JILA

JILA to akronim od nazwy Joint Institute for Laboratory Astrophysics, instytutu naukowego, będącego wspólnym przedsięwzięciem krajowej instytucji metrologicznej USA i Uniwersytetu Kolorado, funkcjonującym od 1962 roku. W tym to instytucji powstał pierwszy na świecie laser He-Ne stabilizowany metanem, jako źródło

promieniowania wykorzystywane w 30-metrowym interferometrze. Uruchomienie tak czułego urządzenia było możliwe dzięki lokalizacji JILA u podnóża Gór Skalistych, w starych sztolniach dawnych kopalni złota, zapewniających wyjątkową stabilność podłoża, niezbędną dla działania tak niezwykle precyzyjnego układu pomiarowego. Prace te były wykonywane pod kierunkiem późniejszego laureata nagrody Nobla, prof. Johna Halla. Hall, będący profesjonalnym metrologiem, gdyż zaczynał swoją karierę zawodową w NBS (National Bureau of Standards), użył interferometru do porównania długości fali lasera stabilizowanego metanem z długością promieniowania lampy kryptonowej, wykorzystywanej przy definicyjnej realizacji metra. Jednocześnie zdefiniowanie w 1967 roku jednostki czasu – sekundy, w oparciu o częstotliwość cezową, umożliwiło precyzyjny i niezależny pomiar częstotliwości linii widmowej tego lasera, poprzez jej porównanie z częstotliwością zegara atomowego. Te dwa niezależne pomiary, długości fali i częstotliwości promieniowania lasera w JILA, doprowadziły do rewelacyjnego wyniku wyznaczenia prędkości światła w próżni  $c$ , obliczonego ze wzoru:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2)$$

gdzie  $\lambda$  to długość fali światła, a  $\nu$  to jego częstotliwość. Wynik ten wynosił:  $c = 299\,792\,456,2(1,1)$  m/s [3] i był ponad tysiącrotnie precyzyjniejszy od pomiarów tej prędkości, wykonanej jeszcze w latach dwudziestych przez Michelsona:  $c = (299\,796 \pm 4)$  km/s [1], metodą pomiaru bezpośredniego. Rezultat powyższy został osiągnięty w 1972 roku i otworzył drogę do zdefiniowania jednostki długości, po raz pierwszy w historii miar SI, w oparciu o niezmienną i uniwersalną stałą fizyczną, jaką jest prędkość światła w próżni. Tak zdefiniowany metr pozwalał na jego realizację, przy użyciu lasera stabilizowanego ze 100-krotnie większą precyzją, niż wynikało to z przyjętej definicji w roku 1960, w oparciu o wielokrotność długości światła lampy kryptonowej. Największym problemem, jaki napotkał zespół Halla, była odkryta asymetria linii widmowej tej lampy, z którą porównywano stabilizowaną linię lasera He-Ne. Innym problemem była też duża różnica pomiędzy długością podczerwonej linii absorpcyjnej metanu  $\lambda = 3,39$   $\mu\text{m}$  [4] a wzorcową pomarańczową linię kryptonu, choć z drugiej strony dawało to znacznie niższą częstotliwość (ok. 88 THz) niż optyczna (widzialna), do porównania z częstotliwością mikrofalową cezu (ok. 9 GHz), co miało pozytywny wpływ na dokładność ich porównania. Dlatego, przyjmując nową definicję metra w 1983 roku, zdecydowano się na niewielką korektę wartości światła w próżni do jej obecnej definiującej postaci:  $c = 299\,792\,458$  m/s, co różni ją od wyniku doświadczalnego zespołu Halla o niecałe 2 m/s.



Jednak John Hall zdawał sobie sprawę, że posługiwanie się laserem He-Ne promieniującym w podczerwieni (niewidocznym dla ludzkiego oka) może być kłopotliwe, dlatego zaproponował stabilizację jego promieniowania molekułami jodu, co umożliwiło wykorzystanie linii czerwonej o długości optycznej  $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$ , zbliżonej do barwy pomarańczowej lampy kryptonowej. Z punktu widzenia metrologicznego niewątpliwą jednak wadą tego typu lasera, jak i innych podobnych źródeł promieniowania jest to, że wytwarzają na ogół jedną, ściśle określoną wzorcową linię widmową. To nasunęło Hallowi myśl, by zrealizować teoretyczny pomysł fizyka niemieckiego Theodora Hanscha, polegający na stworzeniu lasera o promieniowaniu, którego widmo charakteryzuje się regularnymi, znajdującymi się w stałych odstępach liniach częstotliwości, o kształcie kojarzącym się z zębami grzebienia. W zakresie widma optycznego, ze względu na odstęp częstotliwościowy pomiędzy kolejnymi, bardzo wąskimi zębami grzebienia, linii tych byłyby miliony, jak miliony barw (każda linia to inna barwa). Dodatkową zaletą takiego urządzenia byłaby możliwość synchronizacji jego częstotliwości optycznych bezpośrednio za pomocą częstotliwości zegara atomowego, zgodnie z zależnością:

$$\nu_n = \nu_0 + n \cdot \Delta\nu \quad (3)$$

gdzie:  $\nu_n$  to częstotliwość  $n$ -tego zęba grzebienia (pojedynczej linii widmowej),  $\nu_0$  to częstotliwość zsynchronizowana częstotliwością zegara atomowego (wzorca czasu),  $\Delta\nu$  to odstęp częstotliwościowy pomiędzy jego zębami, przy czym  $n$  to bardzo duża liczba naturalna. Laser taki zespołowi Halla udało się uruchomić w 1999 roku. Jego działanie można porównać do linijki (widmowej) z milionami dokładnie naniesionych wskazówek, wyznaczających stałą, równą odległość. Precyzja odtwarzania jednostki miary przy użyciu takiego urządzenia w stosunku do klasycznych już laserów stabilizowanych wzrosła o kolejne 100 razy. Za to osiągnięcie, w 2005 roku Komitet Noblowski przyznał obu fizykom: J. Hallowi i T. Hanschowi nagrodę.

Stworzony w 1999 roku optyczny grzebień częstotliwości można porównać do wzorca metra, z precyzyjnie naniesionymi wskazami w stałych odległościach, którego nośnikiem jest światło.

## Ewolucja dokładności

Pierwszy wzorzec materialny metra (Konwencji Metrycznej) odtwarzał jednostkę miary z niepewnością względną  $10^{-7}$ . Wzorzec ten został ustanowiony decyzją pierwszej Generalnej Konferencji Miar w 1889 roku. Niepewność odtwarzania jednostki długości w układzie interferometru Michelsona z wykorzystaniem lampy kryptonowej, jako źródła promieniowania, wynosiła już  $10^{-9}$ . Zastosowanie lasera stabilizowanego umożliwia odtwarzanie długości ze stabilnością  $10^{-11}$  [5]. Natomiast optyczny grzebień częstotliwości pozwala osiągnąć niepewność rzędu  $10^{-13}$  [6].

Tak oto w ciągu 110 lat niepewność odtwarzania jednostki miary długości poprawiła się aż milionkrotnie. Było to możliwe za sprawą doskonalenia samej definicji metra i ostatecznie oparcie jej na niezmiennej stałej fizycznej, dzięki wyjątkowej własności samego światła, odkrytej przez Michelsona, zanim jeszcze metr w postaci materialnej wszedł do służby. Światło najbardziej przyczyniło się do rewolucji w miarach, gdyż obecnie wszystkie jednostki miar definiowane są w oparciu o stałe podstawowe [7, 8].

## Literatura

- [1] Albert Abraham Michelson noblista z Kujaw. Studia i materiały pod redakcją D. Kurzawy, Strzelno 2007.
- [2] Phillips J.: JILA: The First 50 Years, 2012.
- [3] Evenson K. M., Wells J. S., Peterson F. R., Danielson B. L., Day G. W., Barger R. L., Hall J. L.: Speed of Light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser. *Physical Review Letters* 29 (1972), 1346-1349.
- [4] Barger R. L., Hall J. L.: Wavelength of the 3.39- $\mu\text{m}$  laser-saturated absorption line of methane. *Applied Physics Letters* 22 (1973), 196-199.
- [5] Gliwa-Gliwiński J.: Realizacja międzynarodowej definicji metra w Głównym Urzędzie Miar, *Biuletyn GUM* nr 2 (1996), s. 1-4.
- [6] Szumski R., Czulek D.: Modernizacja państwowego wzorca jednostki długości poprzez zastosowanie syntezy częstotliwości, *PAK*, nr 12 (2010), s. 1561-1564.
- [7] Fotowicz P.: Dlaczego zmieniają się definicje jednostek miar? *Biuletyn GUM* nr 2 (2016), s. 17-20.
- [8] Fotowicz P.: Od metra dawnego do współczesnego, *Biuletyn GUM* nr 1 (2019), s. 71-73.

