

Od metra dawnego do współczesnego

From the old to the modern meter

Paweł Fotowicz (Główny Urząd Miar)

W artykule przedstawiono historię definicji metra, od jej pierwotnej idei powiązanej z długością wahadła matematycznego do współczesnej, powiązanej z prędkością światła w próżni. Droga ta wiodła poprzez artefakty i zjawiska fizyczne, służące do odtwarzania jednostki miary długości. W obu wypadkach, tej dawnej i współczesnej definicji metra, istotą jest odwołanie się do jednostki czasu, poprzez stałą fizyczną.

The article presents the history of the metre definition, from its original idea related to the length of the mathematical pendulum to the modern one, related to the speed of light in a vacuum. This road led through artifacts and physical phenomena used to realization of the length unit. In both cases, this old and modern metre definition, the essence is to refer to the time unit through a physical constant.

Już w XVII stuleciu zastanawiano się nad przyjęciem jednostki miary długości opartej na obiektywnym, stałym i niezmiennym odniesieniu, próbując odejść od jej antropometrycznego sposobu definiowania, opartego na wymiarach ludzkiego ciała, w postaci łokci, stóp czy sążni, jak to bywało przez wieki. Jedną z takich propozycji, w postaci metra powszechnego, przedstawił Polak z wyboru, a Włoch z urodzenia, Tytus Liwiusz Burattini vel Boratyni. Opisał ją w pracy pt. „Miara powszechna”, opublikowanej w 1675 roku [1]. Miara ta miała być oparta na długości wahadła matematycznego o okresie drgań 2 s. Podobne projekty zgłaszali również Picard w 1671 roku i Huyghens w 1673 roku [2].

Długość wahadła matematycznego można wyznaczyć na podstawie:

$$l = g \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

gdzie: T to okres drgań wahadła, g to przyspieszenie ziemskie. Przyjmując wartość przyspieszenia ziemskiego normalnego (na poziomie morza na szerokości geograficznej około $45,5^\circ$) $g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$, długość takiego wahadła to $l = 0,993\ 621\ \text{m}$, a więc niecały współczesny metr. Długość ta ściśle powiązana jest z wartością przyspieszenia ziemskiego, uzależniona od wysokości nad poziomem morza i związana z szerokością geograficzną.

Istotą powyższego rozwiązania było powiązanie jednostki długości z jednostką czasu, właśnie poprzez przyspieszenie ziemskie, podobnie jak to się realizuje współcześnie, ale poprzez powiązanie ze stałą fizyczną w postaci prędkości światła w próżni. Idea ta jednak, ze względu na problematyczność związaną z brakiem ścisłej wiedzy,

dotyczącej wartości przyspieszenia ziemskiego i jego zmienności, nie zyskała akceptacji twórcy pierwszej definicji metra, systemu metrycznego, Pierre’a Simona de Laplace’a, mimo że pierwotnie definicja ta miała być właśnie oparta na długości wahadła sekundowego, zaproponowanej Zgromadzeniu Narodowemu Francuskiemu przez biskupa Talleyranda w 1790 roku. Laplace oparł definicję metra na długości południka przechodzącego przez Paryż, w postaci dziesięciomilionowej części połowy tej długości, która została przyjęta przez Zgromadzenie w 1791 roku [2].

Jednakże praktyczne zrealizowanie definicji metra nie było łatwe, szczególnie w trudnych czasach rewolucyjnych. Zadania tego podjęli się dwaj francuscy uczeni Jean Baptiste Delambre i Pierre Francois Méchain. Delambre wykonywał pomiary metodą triangulacyjną na odcinku od Dunkierki do Rodez, a Méchain pomiędzy Barceloną a Rodez. Niestety Méchain popełnił błąd w pomiarach szerokości geograficznej punktu startowego w centrum Barcelony. Gdy uświadomił to sobie, nie mógł już powtórzyć pomiaru, ze względu na wybuch konfliktu pomiędzy Hiszpanią a Francją. Wraz z Delambre’em postanowił ukryć ten fakt przed komisją metryczną, by nie doprowadzić do unieważnienia przez nią żmudnie wykonywanych obliczeń długości południka przechodzącego przez Paryż, uzyskanych na podstawie wieloletnich pomiarów triangulacyjnych. W roku 1799 ostatecznie przyjęto długość metra, wyznaczoną na drodze pomiarów geodezyjnych i na tej podstawie wykonano z platyny jego materialny wzorec w postaci końcowej (odległość metra wyznaczały końcowe jego powierzchnie). Od tej pory wzorec ten definiował samą jednostkę długości systemu metrycznego. Artefakt zdeponowano w Archiwum



Republiki Francuskiej [2]. Błąd Méchain'a skrócił metr o dwie dziesiąte milimetra w stosunku do definicyjnej jego długości i tak już pozostało do dziś.

Sposób definiowania jednostki długości w oparciu o artefakt przyjęto również po podpisaniu Konwencji Metrycznej w 1875 roku. Metr wyznaczała odległość pomiędzy środkowymi kresami wzorca kreskowego, wykonanego ze stopu platynowo-irydowego. Jednakże dokładność odtwarzania takiej jednostki nie była zbyt wysoka (niepewność względna $2 \cdot 10^{-7}$). Znacznie wyższą odtwarzalność jednostki długości zapewniało zjawisko interferencji fali optycznej, pochodzącej z monochromatycznego źródła promieniowania. Prace nad tym zjawiskiem i budowę przyrządu do jego realizacji prowadził Albert Abraham Michelson, noblista z Kujaw. Ściśle współpracując z Międzynarodowym Biurem Miar już pod koniec XIX wieku zaproponował zdefiniowanie metra w oparciu o wielokrotność długości fali światła.

Michelson, urodzony w Strzelnie koło Bydgoszczy, kształcił się w USA, a całe swoje naukowe życie poświęcił badaniu prędkości światła. W 1887 roku, wraz z Morleyem wykonał eksperyment dowodzący, że światło rozchodzi się ze stałą prędkością niezależnie od kierunku i szybkości jego źródła. Wynik tego eksperymentu posłużył Albertowi Einsteinowi do sformułowania podstawowego postulatu szczególnej teorii względności, mówiącej o stałości prędkości światła w próżni. Dzięki temu prędkość tę można traktować jak stałą fizyczną. Michelson współpracował blisko z Międzynarodowym Biurem Miar i w latach 1892 i 1893 przeprowadzał porównania międzynarodowego wzorca długości z długością fali światła kadmu, na zbudowanym przez siebie układzie pomiarowym zwanym interferometrem. Urządzenie przetransponowano ze Stanów Zjednoczonych do Paryża, gdzie Michelson wykonywał pomiary. Ustalił on długość międzynarodowego wzorca metra, jako wielokrotność 1 553 164 długości linii czerwonej kadmu [3]. Badania te zostały uhonorowane w 1907 roku przez Komitet Noblowski nagrodą za „precyzyjne przyrządy optyczne i pomiary metrologiczne przeprowadzone przy ich użyciu”. Było to wyróżnienie za dokonania w dziedzinie metrologii, dotyczące nowego sposobu definiowania jednostki miary, opartego na zjawisku fizycznym, a nie na artefakcie.

W praktyce idea powyższa została zrealizowana dopiero w drugiej połowie XX wieku, gdy ostatecznie porzucono sposób definiowania długości w oparciu o artefakt na rzecz definicji opartej o zjawisko fizyczne. Definicję metra oparto na wielokrotności długości określonej fali kryptonu, gdyż linia kadmu zawierała kilka blisko siebie znajdujących się częstotliwości promieniowania. Przyjęto ją wraz z wdrożeniem międzynarodowego układu jednostek miar SI w 1960 roku. Dzięki temu można było odtwarzać jednostkę długości z niepewnością względną

$2 \cdot 10^{-8}$, a nawet 10^{-9} [4]. Jednakże lata 60. dwudziestego wieku przyniosły nowe źródło promieniowania, jakim jest laser. Emisja wymuszona, uzyskiwana w obszarze rezonatora tego urządzenia, umożliwia wygenerowanie wyjątkowo wąskiej linii widmowej o szerokości spektralnej, pozwalającej na odtwarzanie długości z niepewnością względną dochodzącą do 10^{-11} , pod warunkiem, że promieniowanie jest stabilizowane, np. przy użyciu par jodu. Interferometry laserowe umożliwiały pomiar odległości z dokładnością lepszą od przyjętej definicji metra w oparciu o promieniowanie monochromatyczne. Musiało to doprowadzić do kolejnej redefinicji jednostki długości i oparcia jej już nie na zjawisku fizycznym, lecz na stałej fizycznej. Wybór padł na prędkość światła, jako niezmienną wartość w próżni. Dlatego definicja metra przyjęta w roku 1983 odwoływała się do umownie ustalonej jej wartości prawdziwej. Dzięki przyjęciu tej definicji możliwe jest wyznaczanie długości fali światła w oparciu o wzór:

$$\lambda \cdot f = c$$

gdzie λ to długość światła, f – jego częstotliwość, a $c = 299\,792\,458$ m/s to umownie przyjęta wartość prawdziwa prędkości światła w próżni. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest zwiększenie dokładności odtwarzania jednostki miary długości, poprzez pomiar częstotliwości i fakt, że sama stała fizyczna, którą uznano za prawdziwą, jest wartością dokładną i nie powiększa niepewności jej wyznaczenia.

W roku 2005 Komitet Noblowski przyznał nagrodę J. Hallowi i T. Hänschowi, za opracowanie „techniki grzebienia częstotliwości optycznych” (the optical frequency comb technique). Technika ta umożliwia wygenerowanie wielu określonych, stabilnych częstotliwości odniesienia (w postaci grzebienia linii widma promieniowania o szerokim zakresie optycznym), które można wykorzystać do wzorcowania laserów stosowanych w układach interferometrów do odtwarzania jednostki długości. Był to kolejny krok ku zaawansowanej technologicznie realizacji definicji jednostki długości, po prawie stuleciu od przyznania tego prestiżowego wyróżnienia za dokonania Michelsona.

Należy też dodać, że zespół Johna Halla już w latach 70. ubiegłego wieku dokonał pomiaru prędkości światła z niezwykłą precyzją dochodzącą do 1 m/s, co utarło drogę do przyjęcia nowej definicji przez Międzynarodowy Komitet Miar w 1983 roku. Pomiary te wykonano poprzez niezależne wyznaczenie długości światła lasera stabilizowanego i jego częstotliwości, odnosząc ją do częstotliwości wzorcowej zegara atomowego [5].

Zgodnie z decyzją Międzynarodowego Komitetu Miar, w 2019 roku nastąpi redefinicja podstawowych



jednostek miar układu SI. Metr ponownie otrzyma nową formułę definicyjną w proponowanym brzmieniu [6]:

metr, oznaczenie m, jest to jednostka SI długości. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej prędkości światła w próżni c , wynoszącej 299 792 458, wyrażonej w jednostce m s^{-1} , przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Definicję tę można przedstawić w postaci wyrażenia [6]:

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

gdzie $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ to częstotliwość promieniowania przejścia kwantowego między dwoma nadsubtelnymi poziomami atomu cezu 133 w stanie podstawowym. Wartość tej częstotliwości definiuje jednostkę miary czasu SI, sekundę [6].

Przedstawiona definicja metra oparta jest na niezmienniej stałej fizycznej i jednocześnie powiązana z podstawową jednostką czasu, sekundą. W pewnym sensie

nawiązuje do pierwotnej idei „miary powszechnej” również opartej na jednostce czasu i stałej fizycznej w postaci przyśpieszenia ziemskiego, której realizacją miało być wahadło matematyczne. Współcześnie jest nim technika z wykorzystaniem grzebienia częstotliwości optycznych, a stałą fizyczną reprezentuje prędkość światła w próżni. Można zatem stwierdzić, że w pewnym sensie historia definicji metra kołem się toczy.

Literatura

- [1] Leschiutta S., Leschiutta M., Tytus Liwiusz Burattini zapomniany metrolog z XVII wieku. Normalizacja 8-9 (1982), s. 52-62.
- [2] Kowalczevska Z., Historia systemu metrycznego, Przegląd Techniczny nr 13 i 14 (1921) s. 85-89.
- [3] Szudy J., Wpływ Alberta Abrahama Michelsona na rozwój fizyki i astronomii. Studia i materiały pod red. D. Kurzawy, Strzelno 2007, s. 23-33.
- [4] Obalski J., Zasady międzynarodowego układu jednostek miar SI, WNT Warszawa 1970.
- [5] Phillips J., JILA: The First 50 Years, 2012.
- [6] Draft of the ninth SI Brochure, 5 December 2018.