



O świecy zwanej kandelą

Andrzej Zięba

Instytut Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH

Prawie każdy podręcznik fizyki zawiera informację o układzie jednostek SI, a w nim tabelkę pięciu jednostek podstawowych. Dociekliwego czytelnika niepokoi ostatnia z nich – kandela. Dowiaduje się, że jest to jednostka „światłości”. Tej, dość dziwnie brzmiącej, wielkości nie omawiają współczesne podręczniki fizyki.

Definicja kandel, tekst wg rozporządzenia 30.11.2002 [1]

Kandela – światłość źródła emitującego w określonym kierunku promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości 540×10^{12} herców i o natężeniu promieniowania w tym kierunku równym 1/683 wata na steradian.

Celem artykułu jest próba rzetelnego przedstawienia natury jednostek oświetlenia. Przekonamy się, że zrozumienie, skąd się wzięła i co robi kandela w układzie SI, jest interdyscyplinarnym zagadnieniem na styku fizyki, fizjologii człowieka, metrologii, prawa, a nawet polityki.

1. Wielkości fizyczne i pozafizyczne

Mierzone przez człowieka wielkości przyporządkować można do dwu, na ogół wyraźnie rozgraniczonych, kategorii. Pierwszą stanowią wielkości, które możemy precyzyjnie zdefiniować i w efekcie zmierzyć z dokładnością zależną tylko od jakości używanych przyrządów pomiarowych. Wielkości te są powiązane ze sobą ścisłymi prawami fizyki, dlatego najczęściej określa się je jako wielkości fizyczne. Wielkościami rozpoznanymi od niepamiętnych czasów jako dające się jednoznacznie zmierzyć są np. czas, długość, masa i objętość naczyń. Współcześnie wszystkie wielkości fizyczne zawarte są w zbiorze wielkości układu SI.

Wielkości pozostałe nazwijmy wielkościami pozafizycznymi. Termin ten jest wprowadzony przez autora artykułu jako dychotomiczne dopełnienie pojęcia „wielkości fizyczne”. W literaturze metrologicznej jego odpowiednikiem jest przydługie określenie „wielkości mierzone za pomocą skal empirycznych” [2].

Wielkości pozafizycznych nie można jednoznacznie zdefiniować i zmierzyć, dlatego, że dotyczą zjawisk i bytów złożonych, takich jak twardość, żyzność gleby, czułość filmu fotograficznego czy liczbowe oceny w studenckim indek-

sie. W szczególności do tej kategorii należą wszystkie wielkości związane z tym najbardziej złożonym organizmem, jakim jest człowiek.

Światłość jest wielkością pozafizyczną, gdyż związana jest z widzeniem światła przez ludzkie oko.

2. Skąd pochodzi kandela?

Definicje wielkości i jednostek pozafizycznych wynikają z potrzeb nauki i praktyki. Jedną z nich była próba odpowiedzi na pytanie, ile światła daje ta czy inna świeca, lampa naftowa, żarówka względnie dioda świecąca.

W czasach gdy nie znano detektorów światła, wymyślono pomiar porównawczy. Na ławie optycznej umieszczano świecę badaną i świecę wzorcową, a pośrodku ekranik z lusterkami umożliwiającymi jednoczesny ogląd jego obydwu stron. Przesuwając ekranik szukano takiego położenia, przy którym obydwie strony ekraniku wydawały się jednakowo jasne [3]. Związek światłości obydwu świec S_x i S_w oraz odpowiednich odległości do ekranika r_x i r_w określa proporcja

$$\frac{S_x}{r_x^2} = \frac{S_w}{r_w^2}. \quad (1)$$

Pomiar taki wymaga zdefiniowania świecy wzorcowej, czyli właśnie kandelii. Przykładowo, w podręczniku fizyki A. Witkowskiego z roku 1908 [3] znajdziemy definicję wzorcowej świecy amyłowej Hefnera-Altenecka. Ma to być „lampka spalająca, bez kominka, czysty octan amyłowy, za pośrednictwem knota bawełnianego, wypełniającego rurkę metalową, wystającą ze zbiornika na 25 mm, średnicy wewnętrznej 8 mm, zewnętrznej 8,3 mm. Wysokość płomienia powinna wynosić dokładnie 40 mm, kierunek promieni poziomy”.

Od łacińskiej nazwy świecy *candela*, pochodzi nazwa naszej jednostki. (Po angielsku świeca to *candle*, w języku polskim znajdziemy ten łaciński rdzeń w słowie *kandelabr*).

3. Jak mierzy się światło dziś?

Pełną informację o świetle w określonym punkcie w pobliżu źródła światła da umieszczenie spektrometru w tym właśnie punkcie i zmierzenie widma światła $I(\lambda)$. Funkcja $I(\lambda)$ zdefiniowana jest jako stosunek natężenia promieniowania (jednostka: W/m^2) w elementarnym przedziale długości fali $d\lambda$ do długości tego przedziału. Całkowite natężenie promieniowania $[\text{W}/\text{m}^2]$ dane jest całką

$$\text{natężenie promieniowania} = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

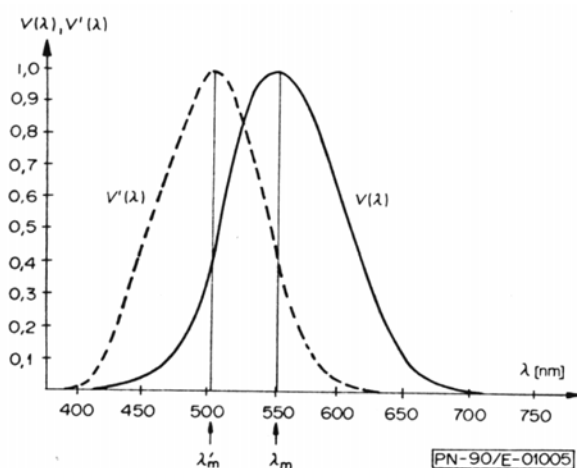
Przypomnijmy przy okazji, że postać funkcji $I(\lambda)$ dla ciała doskonale czarnego o temperaturze T wyprowadził teoretycznie Planck, wykorzystując przełomowe założenie o istnieniu kwantu promieniowania. Scałkowanie wzoru

Plancka (przy wykorzystaniu wzoru (2)) daje prawo Stefana-Boltzmana, stwierdzające, że całkowite natężenie promieniowania I jest proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej.

Wielkości $I(\lambda)$ oraz I są bez wątpienia wielkościami fizycznymi. Natężenie promieniowania I nie może być, niestety, miarą światła widzianego przez oko, gdyż np. dla żarówki przeważająca część emitowanego światła przypada na zakres podczerwieni. *Natężenie oświetlenia* jest wielkością pozafizyczną, biorącą pod uwagę subiektywną wrażliwość oka ludzkiego na światło o różnej długości fali. Współcześnie jest zdefiniowane jako

$$\text{natężenie oświetlenia} = K_m \int_0^{\infty} I(\lambda)V(\lambda)d\lambda, \quad (3)$$

gdzie $V(\lambda)$ oznacza bezwymiarową funkcję czułości oka ludzkiego (rys. 1). Funkcję $V(\lambda)$ normalizuje się do jedności dla żółtozielonego światła o długości fali $\lambda_m = 555$ nm (częstotliwość 540 THz), dla którego czułość oka przy widzeniu dziennym jest najwyższa.



Rys. 1. Krzywa względnej czułości oka ludzkiego wg normy PN-90/E-01005. Linia ciągła dotyczy natężenia oświetlenia rzędu kilku luksów, gdy za wrażenia wzrokowe odpowiedzialne są czopki siatkówki oka (widzenia dzienne). Krzywa przerywana dotyczy słabego oświetlenia poniżej kilku setnych luksa, gdy za widzenie odpowiedzialne są tzw. pręciki (widzenie nocne)

Jeżeli przyjąć wartość stałej $K_m = 683$ lx/W, wzór (3) daje natężenie oświetlenia w luksach. Przedstawiona na rys. 1 standardowa funkcja czułości oka $V(\lambda)$ i wartość stałej K_m określa w Polsce norma PN-90/E-01005 *Technika świetlna. Terminologia* (1991) [4]. (Litera E w symbolu normy informuje, że norma ta jest zgodna z normami europejskimi.) Funkcja $V(\lambda)$ została ustalona

przez empiryczne badania na grupie ochotników i jest do pewnego stopnia umowna – każdy z nas widzi światło nieco inaczej, szczególnie daltoniści.

Zatem we współczesnym, skodyfikowanym prawnie ujęciu, konstrukcja jednostek oświetlenia wychodzi od natężenia oświetlenia i jej jednostki – luksa. (We wzmiankowanej normie [4] przejawia się to w fakcie, że wzór całkowity (3) i występujące w nim wielkości znajdziemy w jej tekście przed definicjami lumina i kandeli.) Przedstawiona kombinacja fizycznego widma światła $I(\lambda)$ i krzywej czułości oka $V(\lambda)$ jest podstawą cechowania przyrządów do pomiaru natężenia oświetlenia – luksomierzy. Przez dobór materiału półprzewodnikowego detektora i użycie filtru o odpowiedniej charakterystyce staramy się doprowadzić do tego, by wskazania luksomierza były w miarę możliwości równe wartości natężenia oświetlenia zdefiniowanego przez wzór całkowity (3).

Wielkością pochodną od natężenia oświetlenia jest strumień świetlny (jednostka: lumen), zdefiniowany jako iloraz natężenia oświetlenia i kwadratu odległości od źródła. Oczywiście przy założeniu, że źródło jest małe i świeci izotropowo. Strumień świetlny jest wielkością określającą wydajność źródeł światła. Przykładowo, wydajność diody białej (używanej np. we współczesnych lampach turystycznych) jest większa od wydajności żarówki o tej samej mocy. W ujęciu tym światłość jest wielkością nie tylko pozafizyczną, ale również w istocie niepotrzebną – definicja kandeli (*vide* ramka) określa jednocześnie tylko wartość współczynnika K_m we wzorze (3).

4. Natura wielkości mierzonych a przepisy prawa

Podział jednostek miary na fizyczne i pozafizyczne odzwierciedla się w prawodawstwie większości krajów tym, że jednostki fizyczne legalizuje się przez ustawowe przyjęcie układu SI zaś niejednoznaczne definicje jednostek pozafizycznych są określone przez normy techniczne. Przykładowo, naszą ustawę *Prawo o miarach* [5] rozpoczyna jednozdaniowy artykuł 1 o charakterze preambuły: „Celem ustawy jest zapewnienie jednolitości miar i wymaganej dokładności pomiarów wielkości fizycznych w Rzeczypospolitej Polskiej”. Innym przejawem wyróżnienia jednostek fizycznych w prawodawstwie polskim jest podstawowe rozporządzenie wykonawcze [1] do prawa o miarach, wyszczególniające m.in. legalne jednostki miar nienależące do układu SI. Wszystkie z nich są jednostkami wielkości fizycznych.

Określenie i legalizację miar wielkości pozafizycznych określają przyjęte przez Polskę normy techniczne. Obok wzmiankowanej normy dotyczącej jednostek oświetlenia mamy liczne normy określające jednostki i sposoby mierzenia wielkości pozafizycznych. W przypadku twardości mamy nie jedną, lecz szereg norm, gdyż wielkość ta mierzona jest za pomocą wielu skal empirycznych (Mohsa, Brinella, Vickersa...). Ich źródłem jest jednocześnie Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (International Standardization Organisation, w skrócie ISO).

Zatem ISO zajmuje się metrologią wielkości pozafizycznych, natomiast źródłem pojęć i przepisów prawnych dotyczących metrologii wielkości fizycznych jest, powołana w roku 1975, Międzynarodowa Konfederacja Miar, której organem wykonawczym jest Biuro Miar i Wag w Sèvres pod Paryżem (BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures*). BIPM stoi na stanowisku, że wszystkie mierzone wielkości tworzą jednolity zbiór, bez podziału na wielkości fizyczne i pozafizyczne. Jego konsekwencją jest niechęć do odpowiedzi na pytanie, dlaczego właśnie kandela – jedna z wielu jednostek pozafizycznych – dostępuje zaszczytu uznania za jednostkę podstawową układu SI. Pozamerytoryczną przyczyną wyróżnionej pozycji kandelii w układzie SI jest też, jak uważa autor, kult, jakim w ojczyźnie metra i kilograma otaczana jest epoka *Oświecenia*.

5. Przyszłość kandelii w świetle ewolucji wzorców układu SI

Ewolucja wzorców jednostek miar polega na zastępowaniu wzorców nieodtwarzalnych (np. metr jako odległość między rysami na sztabie ze stopu Pt-Ir) przez wzorce odtwarzalne (metr jako droga przebyta w próżni przez światło w czasie $1/299\,792\,458$ sekundy). Obecnie trwa debata nad zastąpieniem obecnego wzorca kilograma (cylinder Pt-Ir przechowywany w BIPM) na odpowiedni wzorec odtwarzalny. Przedmiotem sporu jest nie tyle konieczność zmiany wzorca kilograma, ile pytanie, który z proponowanych nowych wzorców zostanie przyjęty [6]. Zmiana definicji kilograma pociągnie za sobą redefinicję jednostki liczności materii – mola. Decyzje w tych sprawach mają zapaść na spotkaniu Międzynarodowej Konfederacji Miar planowanym na rok 2011.

Byłaby to dobra okazja do usunięcia kandelii ze zbioru jednostek podstawowych układu SI. Nie przeszkodzi to w najmniejszym stopniu w dalszym używaniu luksa i lumena jako ważnych jednostek pozafizycznych ani spójności reszty układu SI. Potrzebna jest jednak w tym celu akcja informacyjno-lobbingowa np. ze strony środowisk fizycznych. Trawestując znane powiedzenie o wojnie i generałach: jednostki miar są sprawą zbyt ważną, by decyzje o nich pozostawić wyłącznie metrologom.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 listopada 2006 r. w sprawie legalnych jednostek miar (Dz. U. z dnia 8 grudnia 2006 r.). Dostępne w Internecie.
- [2] Piotrowski J., *Teoria pomiarów. Pomiarzy w fizyce i technice*. PWN, Warszawa 1986 (oraz inne podręczniki i skrypty tego autora).
- [3] Witkowski A., *Zasady Fizyki*, t. 2, Księgarnia Wende i S-ka, Warszawa 1908.
- [4] Norma PN-90/E-01005 Technika świetlna. Terminologia (1991).
- [5] Ustawa z dnia 11 maja 2001 Prawo o miarach (tekst jednolity). Dziennik Ustaw Nr 243, poz. 2441 z 2004 r. Dostępna w Internecie.
- [6] Gluza J., Grzanka A., Pleban A. (2007). *Ku nowej definicji kilograma*. „Postępy Fizyki” 53, 98–102.