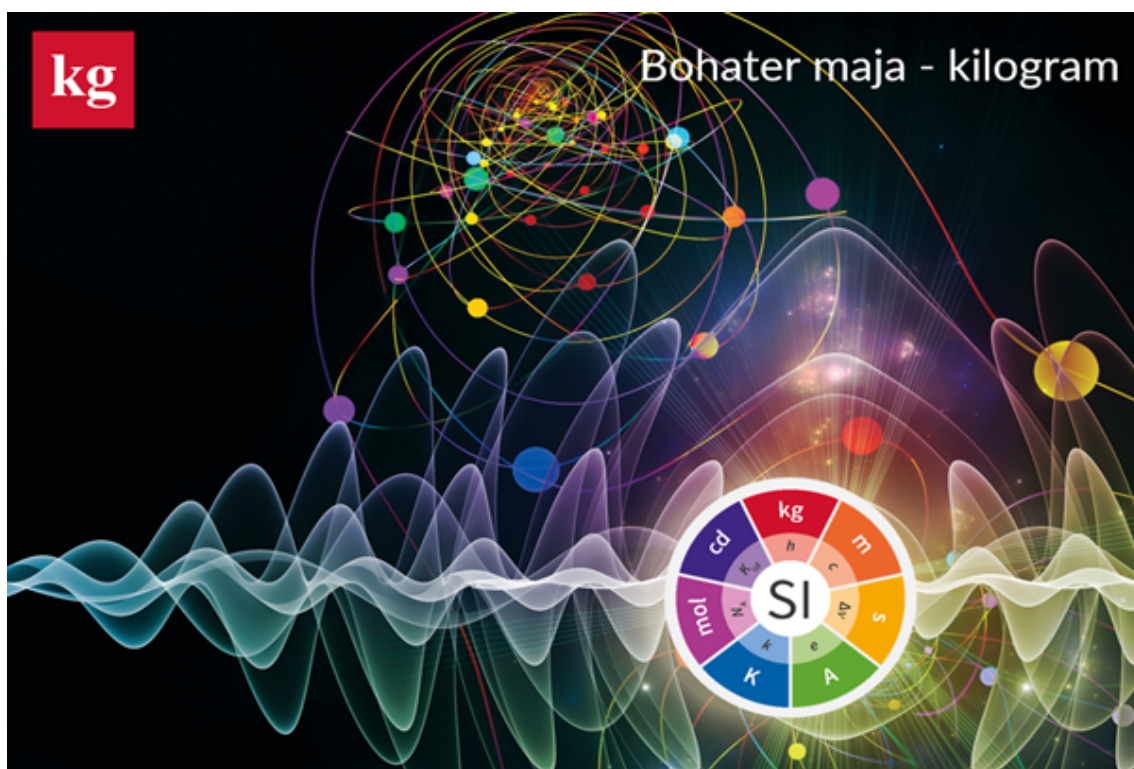


## Przywitaj nowy kilogram!

Autor : Aleksandra Gadomska  
Opublikowane przez : Sebastian Margalski

20 maja 2019 roku – zapamiętaj tę datę! Dokładnie tego dnia nowe definicje podstawowych jednostek miar układu SI weszły w życie. W to metrologiczne święto przywitajmy naszego majowego bohatera – kilogram – ostatnią jednostkę SI prezentowaną w ramach naszego cyklu, a także ostatnią materialną jednostkę miary układu SI.



Masa to wielkość nierozzerwalnie połączona z ludzkością już od tysięcy lat. Wymiana handlowa to jedna z pierwszych potrzeb ludzkości, stale rozwijająca się. Już kilka tysięcy lat przed naszą erą ludzie wymieniali między sobą towary i potrzebowali wiedzieć, w jakich ilościach wymieniają. Już w starożytnym Egipcie jako wzorce masy stosowano kamienne odważniki, potem odlewano je z brązu, a do wczoraj międzynarodowym wzorcem masy był również wzorzec materialny – walec wykonany ze stopu platyny i irydu (90 % Pt i 10 % Ir).

Niepozorny artefakt, ukryty w skarbcu w Sevres, stanowił odniesienie dla pomiarów masy na całym świecie przez ponad 100 lat. Zapytasz dlaczego niepozorny? Platyna jest jednym z najcięższych pierwiastków z grupy platynowców, wymiar naszego „ostatniego artefaktu” to tylko 39 mm średnicy podstawy i tylko 39 mm jego wysokości – to tak naprawdę bardzo niewielki walec.

## Umarł król, niech żyje król!

Od dzisiaj ostatni artefakt nie będzie już głównym odniesieniem dla światowych pomiarów masy. Zostanie zastąpiony przez literę  $h$ . Fizycy mówią, że to stała Plancka. Ale co wspólnego może mieć stała stosowana zwykle w fizyce kwantowej z kilogramem? Jak można wykorzystać ją do pomiarów masy? Te pytania cisną się na usta wszystkim, dla których dotychczasowy sposób na definiowanie kilograma był taki prosty i namacalny. Postaramy się rozjaśnić tę kwestię w dalszej części artykułu, na razie spróbujemy odpowiedzieć na inne pytanie, które często pojawia się w kontekście redefinicji kilograma...

## Cóż było złego w artefakcie?

Od 1889 r. kilogram zdefiniowany był jako masa międzynarodowego wzorca kilograma. Każdy kraj, sygnatariusz konwencji metrycznej, otrzymał kopię wzorca i przechowywał ją jako państwowy wzorec jednostki masy – prototyp kilograma. Wszystkie teoretycznie identyczne kopie wzorca są okresowo porównywane z wzorcem międzynarodowym, a pomiary wykonane w ramach tych porównań wskazywały różnice w wartości masy tych wzorców. Ostatnie wykonane porównania pokazały, iż rozrzut pomiędzy masami wynosi już 50  $\mu\text{g}$ . Choć zwykłemu człowiekowi, który kupuje mąkę w sklepie, wydaje się to bardzo niewiele, to dla nauki jest to wartość ogromna. Choćby w dziedzinie medycyny, przykładowe 50  $\mu\text{g}$  to dzienna dawka witaminy D dla noworodka.

## Stała Plancka – jak z niej otrzymać kilogram?

Stała Plancka to jedna z podstawowych stałych fizycznych. To kwant działania elektromagnetycznego, wiąże energię niesioną przez foton z jego częstotliwością i pojawia się w większości równań mechaniki kwantowej. Jako że masa związana jest z energią (pomyśl o słynnym równaniu Einsteina  $E = mc^2$ ), również wiąże masę z częstotliwością (wzór Plancka  $E = n \nu h$ ). Aby lepiej zrozumieć, jak możemy „zrobić z tej stałej kilogram”, posłużymy się przykładem wagi o specjalnej konstrukcji – wagi prądowej wata (zwanej także *Watt balance*, *Joule balance* lub *Bryan Kibble balance* od nazwiska zasłużonego naukowca), która obecnie jest stosowana w realizacji „nowego” kilograma.

Przyjrzyjmy się zwykłej wadze równoramiennej. Na jednej szalce umieszczamy obiekt o nieznanym masie i równoważymy go odważnikami o znanej masie, które

umieszczamy na drugiej szalce. Jeśli uda nam się osiągnąć stan równowagi, wiemy że masa nieznanego obiektu na jednej szalce i masa odważników na drugiej szalce są sobie równe (oczywiście w przybliżeniu, pamiętać należy o błędach: nierównoramienności i zakresu uchylnego oraz zmienności wskazań). W tym przypadku równoważymy siły mechaniczne, siłę przyciągania ziemskiego obiektów na obu szalkach. To jest proste, prawda?

Wyobraź sobie teraz, że zabieramy z jednej szalki odważniki, a siłę grawitacji działającą na obiekt o nieznannej masie równoważymy siłą wytworzoną przez elektromagnes. Da się to wyobrazić, prawda? Wyobraź sobie, że szalkę, na której zazwyczaj stawiamy odważniki, mocujemy do cewki w której płynie prąd i umieszczamy ją w stałym, zewnętrznym polu magnetycznym. Na pewno wiesz, że prąd płynący w przewodzie wytwarza pole magnetyczne. Na pewno orientujesz się też, jak działa elektromagnes. Dobrze też wiesz że magnesy mogą przyciągać się lub odpychać. Tak samo w tym przypadku, płynący w cewce prąd powoduje, że cewka (która w wyniku przepływu prądu sama staje się „magnesem”) jest wciągana lub wypychana z zewnętrznego pola magnetycznego. Im większy prąd, tym większe natężenie pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę. Można wyobrazić sobie, że odpowiednia wartość i kierunek prądu, płynącego w cewce, wygeneruje takie pole magnetyczne, że cewka zostanie wciągnięta w stałe, zewnętrzne pole magnetyczne w taki sposób, żeby osiągnąć zrównoważenie wagi. Procedurą tą osiągnęliśmy zrównoważenie nieznannej masy na jednej szalce, siłą elektromagnetyczną wytworzoną w cewce umocowanej do drugiej szalki. Zrównoważyliśmy właśnie siłę mechaniczną z siłą elektromagnetyczną!

Zapytasz zapewne, gdzie w tym wszystkim jest stała Plancka? Jak się pewnie domyślasz zrównoważenie sił to tylko początek skomplikowanego procesu pomiarowego. Musimy przecież dokładnie zmierzyć prąd pośrednio z oporu – kwantowym efektem Halla i napięcie – kwantowym zjawiskiem Josephsona, przyspieszenie ziemskie ultra czułym grawimetrem, prędkość pośrednio interferometrem laserowym, a czas cezowym zegarem atomowym i jeszcze bardzo wiele innych parametrów, aby dokładnie ustalić nieznaną masę. Właśnie do tych pomiarów potrzebujemy stałej Plancka. Do tego wszystkiego układ pomiarowy wagi prądowej jest umieszczony w próżni.

## Definicje: stara i nowa

Definicja kilograma do dnia 20 maja 2019 r. brzmiała następująco:

**kilogram — jednostka masy, która jest równa masie międzynarodowego prototypu kilograma, przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar w Sevres.**

Już od dziś obowiązuje nowa definicja kilograma, która brzmi następująco:

kilogram, oznaczenie kg, jest to jednostka SI masy. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Plancka  $h$ , wynoszącej  $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ , wyrażonej w jednostce J s, która jest równa  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , przy czym metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą  $c$  i  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

Jak widzisz, nowa definicja jest więcej niż skomplikowana. Ale dzięki zastosowaniu stałych fizycznych, pochodzących z natury, naukowcy będą mogli bardzo dokładnie i stabilnie przerosić jednostkę i wyznaczać masę. Nowa definicja oznacza również, że kilogram nie będzie zmieniał się w czasie, tak jak dotychczasowy wzorec materialny.

Poniżej krótki opis definicji dla odważnych i bardziej zaawansowanych w fizyce:

Z nowej definicji kilograma wynika dokładna zależność

$h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-1}$ . Przekształcenie tej zależności daje wyrażenie na określenie kilograma w odniesieniu do stałych definiujących  $h$ ,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  i  $c$ .

$$1 \text{ kg} = \left( \frac{h}{6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s}$$

co jest równe:

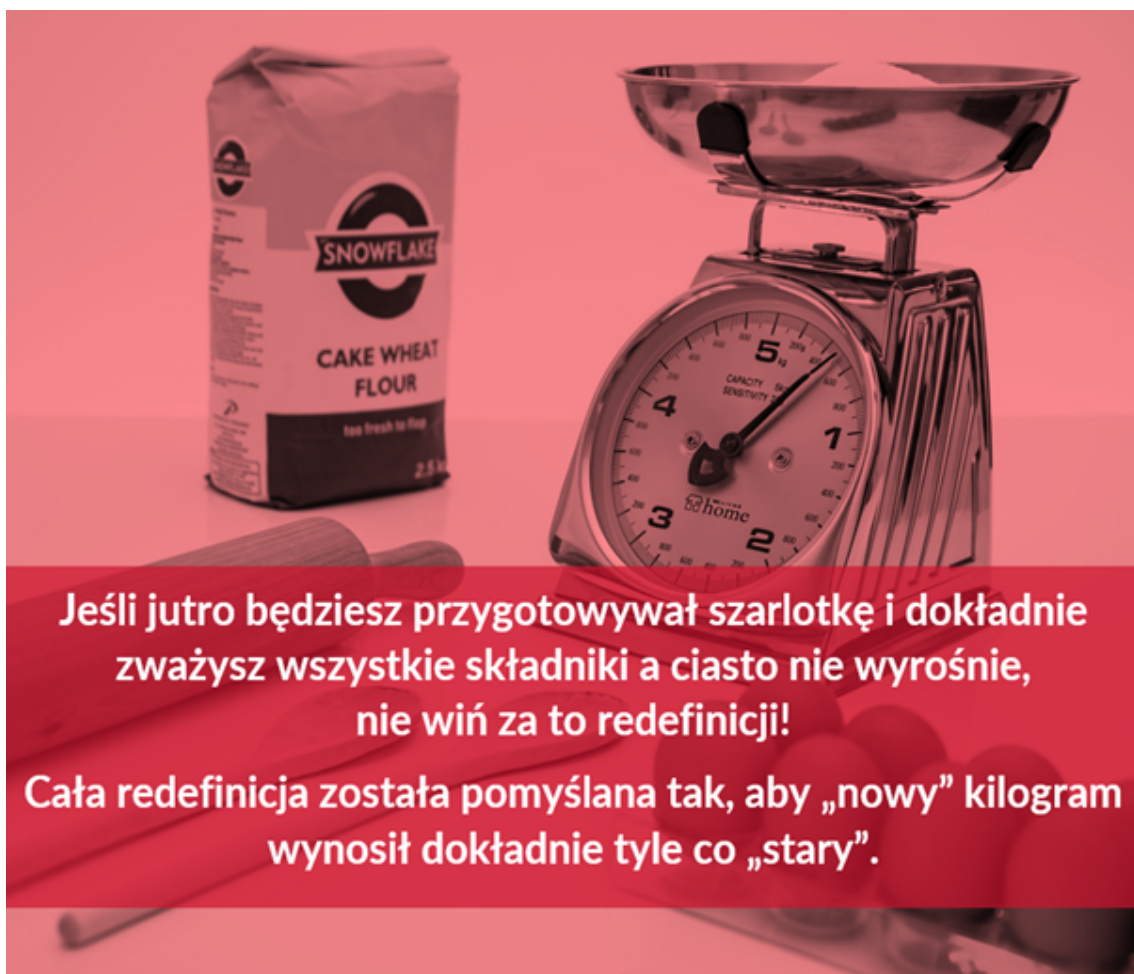
$$1 \text{ kg} = \frac{(299\ 792\ 458)^2}{(6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34})(9\ 192\ 631\ 770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\ 5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

Definicja określa jednostkę  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$  (jest to jednostka, w której wyraża się wielkości fizyczne np., moment pędu). W połączeniu z definicją metra (m) i sekundy (s) prowadzi to do określenia jednostki masy (kg), poprzez stałą Plancka  $h$ .

Temat nie jest prosty, wymaga zrozumienia wielu fizycznych zjawisk i zastosowania wielu wzorów. Jeśli jednak chciałbyś zgłębić nieco tematykę redefinicji kilograma, polecamy kilka źródeł, z których możesz zacząć swoją przygodę z „nowym” kilogramem.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Kibble\\_balance](https://en.wikipedia.org/wiki/Kibble_balance)

<https://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/>



**Jeśli jutro będziesz przygotowywał szarlotkę i dokładnie  
zważysz wszystkie składniki a ciasto nie wyrośnie,  
nie wiń za to redefinicji!**

**Cała redefinicja została pomyślana tak, aby „nowy” kilogram  
wynosił dokładnie tyle co „stary”.**