



A constante de Planck deve substituir o cilindro metálico usado desde 1889 como referência internacional do quilograma

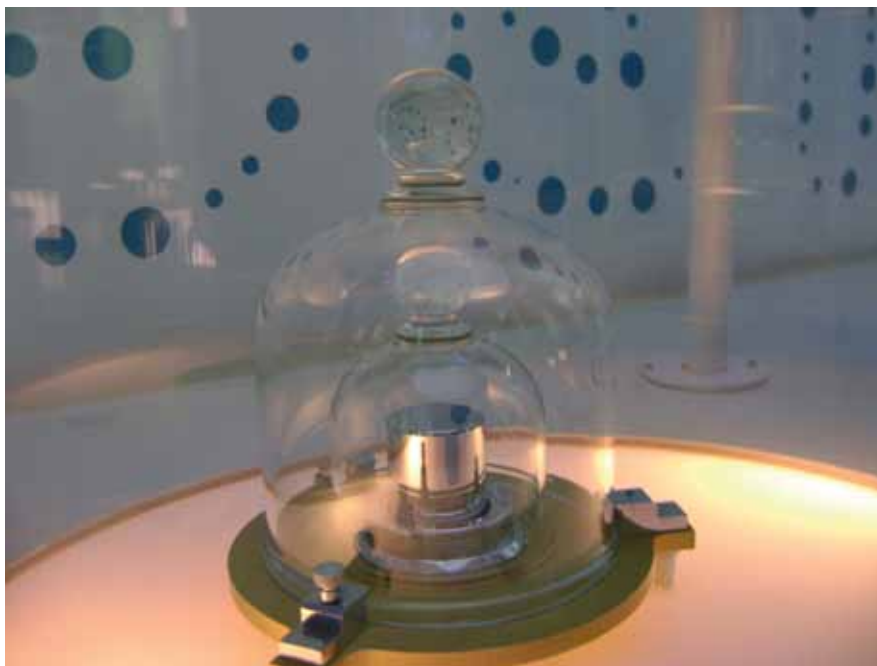
Depois de décadas de debates, físicos e outros especialistas em medições, os metrologistas, estão finalizando a redefinição do conceito de quilograma, a unidade básica de medida da massa no Sistema Internacional de Unidades (SI). A partir de 2018, se os planos derem certo, o quilograma usado como referência mundial para mensurar a quantidade de matéria dos corpos deixará de ser representado por um objeto: o protótipo internacional do quilograma, um cilindro feito de uma liga especial de irídio e platina com massa igual à de 1 litro de água muito pura (destilada). No lugar desse cilindro metálico, guardado a vácuo desde 1889 sob redomas de vidro no Escritório Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), em Sèvres, na França, deve-se passar a definir o quilograma a partir de uma constante fundamental da física, uma grandeza que, ao menos em teoria, é universal e não se altera com o tempo. Essa mudança, segundo os físicos, deve democratizar a capacidade de medir-se com precisão o quilograma, uma vez que não se dependerá mais da comparação com o cilindro metálico de Sèvres.

Réplica do protótipo
exposta no museu Cité
des Sciences et de
l'Industrie, em Paris

A grandeza invariável que servirá de base para definir o quilo é a constante de Planck. Proposta em 1900 pelo físico alemão Max Planck (1858-1947), essa constante, representada pela letra h , estabelece uma relação entre a energia das partículas de luz (fótons) e a frequência com que elas vibram. É medida em unidades de energia (joule) multiplicadas por unidade de tempo (segundo) e descreve vários fenômenos do universo das partículas elementares. Seu valor é um número extremamente pequeno – aproximadamente $6,63 \times 10^{-34}$ joules-segundo, um número com 34 zeros depois da vírgula – que se mede cada vez com mais precisão. Embora o valor de uma constante seja inalterável, seus valores medidos mudam conforme o grau de precisão das diferentes medições. Como essa precisão nunca é absoluta, é impossível conhecer o valor absoluto de uma constante. Para contornar o problema, físicos e metrologistas devem estabelecer um valor consensual, a ser definido em julho deste ano, para a constante de Planck.

A relação entre essa constante, que trata de fenômenos do mundo subatômico, e a massa equivalente à de 1 litro de água pura não é óbvia. Ela emerge de experimentos propostos no final dos anos 1950 para medir com mais precisão o valor do ampere, a unidade de medida da corrente elétrica. Para esses experimentos, criou-se um aparelho – mais tarde chamado de balança de watt – que funciona equilibrando duas forças, como as balanças usadas até tempos atrás para pesar alimentos nas feiras-livres. Nessas balanças, com dois pratos suspensos por uma barra, a massa a ser medida é colocada em um dos lados e deve entrar em equilíbrio com objetos (contrapesos) de massa conhecida, posicionados no outro. Já a balança de watt substituiu o efeito dos contrapesos pelo de uma força magnética.

Em meados dos anos 1970, o físico e metrologista inglês Bryan Kibble, do Laboratório Físico Nacional (NPL), em Teddington, Inglaterra, mostrou como a balança de watt podia ser usada para



Essa é a última das principais unidades internacionais de medida ainda definida com base em um objeto

medir tanto a massa de um objeto como a constante de Planck de modo muito preciso. O segredo da precisão dessa balança – depois aprimorada pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (Nist), dos Estados Unidos, e renomeada em 2016 para balança de Kibble – é o seu funcionamento em duas etapas.

Em um primeiro momento, coloca-se o objeto cuja massa será medida em um dos pratos da balança, que está imerso no campo magnético de um grande ímã. A ação da gravidade sobre essa massa gera uma força chamada peso, que faz o prato baixar. Como o prato está imerso

no campo magnético do ímã, a passagem de uma corrente elétrica pela bobina instalada na base do prato produz uma força magnética (de mesma intensidade e sentido contrário) que se contrapõe à força-peso. Assim, mede-se com precisão a corrente elétrica que equilibra perfeitamente o prato – essa corrente é proporcional ao peso e, portanto, à massa. Para haver o equilíbrio, a força-peso tem de ser igual à força magnética, definida por uma constante multiplicada pela corrente. O problema, então, é determinar com alta precisão o valor da constante.

Aí entra a genialidade de Kibble. Ele percebeu que, realizando outra medição, torna-se desnecessário conhecer o valor dessa constante. Em uma segunda operação, retira-se o objeto do prato e prende-se o fio que o sustenta a um motor, que faz a bobina se mover na vertical sempre com a mesma velocidade. O movimento da bobina no interior do campo magnético induz nela o surgimento de uma voltagem, proporcional à velocidade de deslocamento. Essa voltagem é definida pela velocidade de deslocamento dividida por uma constante, justamente aquela da primeira etapa de medição. Como existe uma relação de proporcionalidade entre a corrente e a voltagem, uma operação matemática permite eliminar essa constante das equações e definir a massa do objeto em função da velocidade. Na medição da corrente e da voltagem, usam-se equipamentos feitos de

materiais especiais que funcionam como supercondutores a baixíssimas temperaturas. Nesses materiais, as correntes e as voltagens são quantizadas, o que significa que só assumem valores múltiplos da constante de Planck.

Hoje, diferentes grupos usam a balança de watt para, por meio dessa sequência de procedimentos, medir o valor da constante de Planck a partir de uma massa previamente conhecida – no caso, eles usam o protótipo do quilograma e suas réplicas, cuja massa se conhece com muita precisão. Assim que as medições atingirem um grau aceitável de precisão, o cilindro de Sèvres e suas cópias se tornarão desnecessários para as futuras aferições. É que, embora bem conhecida, a massa desses cilindros deve continuar mudando, enquanto o valor da constante, uma vez obtido com precisão, permitirá usar a balança de watt para medir a massa que corresponde a exatamente 1 quilograma de modo muito preciso e sem alteração ao longo do tempo.

CONTANDO ÁTOMOS

A busca de novos critérios para definir o quilo começou na década de 1980, quando se constatou um problema com o cilindro metálico de Sèvres: o quilograma usado como referência mundial estava perdendo massa, possivelmente por sua manipulação na limpeza ou pela evaporação do material que o compõe. Medi-



Em julho, especialistas devem definir o valor da constante de Planck a ser usado no cálculo da unidade de massa

Esfera de silício usada no Projeto Internacional Avogadro

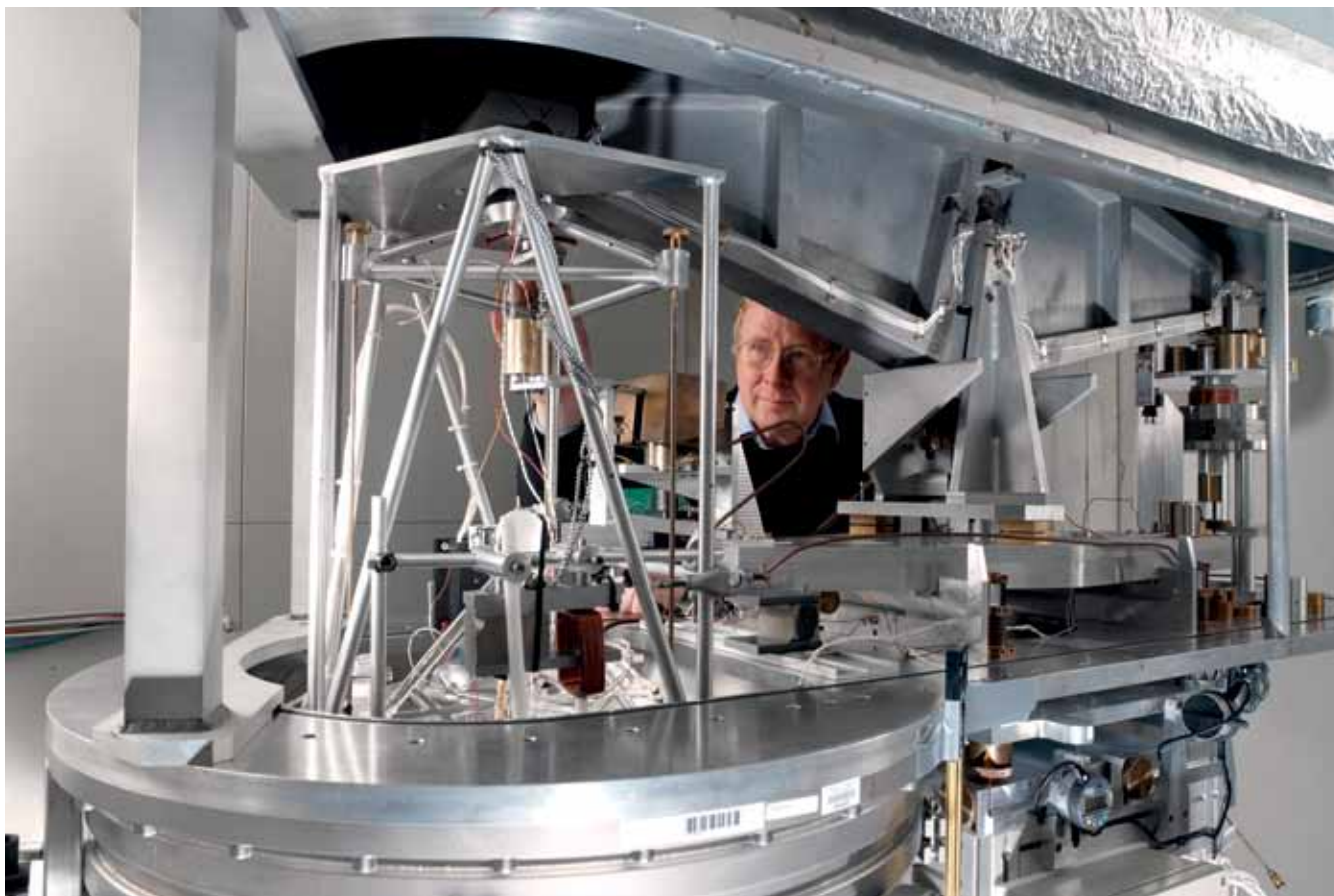


ções realizadas de tempos em tempos no último século revelaram também que a massa das cópias do quilo distribuídas pelo mundo oscilava – algumas ganhavam e outras perdiam frações de 1 grama. Mesmo muito pequena, essa variação é indesejável para uma unidade de medida. É que, para servir como base de comparação, o padrão que define essa unidade deve ser quantificado com a maior precisão possível e permanecer inalterado ao longo do tempo.

Em 2011, a Conferência Geral sobre Pesos e Medidas (CGPM), organização internacional com 51 estados-membros, entre eles o Brasil, reconheceu oficialmente as limitações do quilograma padrão e decidiu que a unidade de massa deveria ser redefinida a partir do valor das constantes fundamentais da física, medidas de forma cada vez mais precisa. Uma comissão de especialistas da CGPM decidiu que a unidade de massa deveria ser estabelecida a partir da constante de Planck. Antes, no entanto, recomendou que o valor da constante fosse definido a partir das três medições mais precisas, feitas usando ao menos dois métodos diferentes – o resultado das medições com as técnicas distintas deveria ser concordante e apresentar um nível de incerteza inferior a um valor preestabelecido.

O primeiro desses métodos consiste em definir o valor da constante de Planck a partir da contagem dos átomos de uma esfera de silício puro com massa de 1 quilograma. A contagem dos átomos dessa esfera permite calcular o valor da constante de Avogadro, que indica o número de partículas em uma determinada massa, e, posteriormente, chegar ao valor da constante de Planck. Contando os átomos dessas esferas especiais – há apenas duas no mundo, cuidadosamente produzidas a um custo de US\$ 3,2 milhões cada –, os pesquisadores do Projeto Internacional Avogadro já conseguiram medir o valor da constante de Avogadro, e consequentemente da de Planck, com uma imprecisão de 30 partes por bilhão. Esse grau de exatidão corresponderia a medir um quarteirão de 100 metros de comprimento com uma variação de micrômetros.

A outra forma de medir a constante de Planck usa a balança de watt. Trabalhando com uma das versões mais recentes da balança produzida pelo Nist, o físico Stephan Schlamminger e sua equipe mediram a constante de Planck com uma



Na balança de watt, uma força magnética faz o papel dos contrapesos das balanças antigas

incerteza de 34 partes por bilhão. Esse resultado, publicado em 2016 na revista *Review of Scientific Instruments*, indica que a balança de watt de quarta geração, Nist-4, em operação desde 2015, seria acurada o suficiente para ser usada para redefinir o quilograma. Mais recentemente, pesquisadores do Conselho Nacional de Pesquisa (NRC) do Canadá, usando a balança de watt produzida por Kibble nos anos 1970, obtiveram uma incerteza menor, de nove partes por bilhão. Esses e outros grupos terão de submeter seus resultados até julho deste ano à CGPM, que estabelecerá o valor a ser usado no cálculo do quilograma.

“O valor da constante de Planck já atingiu um grau de precisão mais do que suficiente para ser usado na nova definição do quilograma”, diz o físico Vanderlei Bagnato, professor do Instituto de Física de São Carlos (IFSC) da Universidade de São Paulo. Ele preside a comissão das constantes fundamentais da União Internacional de Física Pura e Aplicada (Iupap), uma das instituições que colaboram para a redefinição do qui-

lograma e que deverá discutir o assunto em sua reunião anual, que se realizará pela primeira vez em São Paulo em outubro deste ano. “Não precisamos mais depender de um artefato como o cilindro metálico de Sèvres”, acrescenta.

À MODA ANTIGA

O quilograma é a última das sete principais unidades internacionais de medida ainda aferida com base em um objeto – a mensuração das outras já é feita há anos por meio de constantes fundamentais da física. Com a alteração, que pode valer a partir de 2018, a aferição deve se tornar mais confiável, o que tem importância óbvia para a física – o quilograma entra na definição de outras 20 unidades de medida – e para o comércio internacional. Em princípio, também deve se tornar mais acessível a averiguação do valor do quilo. Qualquer laboratório com tecnologia suficiente para produzir uma balança de watt bastante precisa será capaz de medir com exatidão a massa dos corpos, dispensando a necessidade de ter acesso ao artefato guardado na França.

A nova forma de medir o quilograma não afetará o dia a dia das pessoas. “Nada mudará na vida de quem frequenta as padarias, lojas, supermercados ou aeroportos”, diz o físico Humberto Brandi, professor titular aposentado da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e diretor de metrologia científica do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). “Essa mudança beneficiará o comércio internacional de produtos manufaturados de alta tecnologia e das áreas da saúde.” A chamada metrologia científica tem um papel importante, por exemplo, no controle de qualidade de produtos exportados e importados, ajudando no estabelecimento de padrões internacionais de comércio – principalmente em produtos de alta tecnologia. ■

Artigos científicos

HADDAD, D. *et al.* Invited article: A precise instrument to determine the Planck constant, and the future kilogram. *Review of Scientific Instruments*. v. 87. 061301. 2016.
MANA, G. *et al.* The correlation of the N_A measurements by counting ^{28}Si atoms. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. v. 44. 031209. 2015