

## TAREFAS

- Determinação da posição de equilíbrio inicial do pêndulo de torção.
- Registro da oscilação do pêndulo de torção ao redor da posição de equilíbrio final e determinação da duração de oscilação.
- Determinação da posição de equilíbrio final.
- Cálculo da constante gravitacional  $G$ .

## OBJETIVO

Medição da força gravitacional e determinação da constante gravitacional com a balança de torção de Cavendish

## RESUMO

O cerne da balança de torção de Cavendish é um pêndulo de torção sensível apoiado sobre um par de pequenas esferas de chumbo. Estas são atraídas por um par de esferas grandes de chumbo. Daí, a posição das esferas grandes de chumbo determina a posição de equilíbrio do pêndulo de torção. Se as esferas grandes são levadas a uma segunda posição, em posição espelhada em relação à primeira relativamente às massas pequenas, o pêndulo de torção assume, após um procedimento de oscilação, uma nova posição de equilíbrio. A partir das duas posições de equilíbrio e das medições geométricas da disposição, pode-se definir a constante gravitacional. Nisto, o equilíbrio entre a força gravitacional e o torque de redefinição do fio de torção é decisivo. As oscilações do pêndulo de torção são medidas com um sensor diferencial capacitivo, que suprime amplamente as partes de ruído e vibração do sinal. O fio de tungstênio do pêndulo de torção é selecionado tão fino que a duração da oscilação do pêndulo de torção está no âmbito de poucos minutos, de forma que dentro de uma hora possam ser observadas múltiplas oscilações ao redor da posição de equilíbrio.

## APARELHOS NECESSÁRIOS

Número	Instrumentos	Artigo Nº
1	Balança de torção de Cavendish	1003337
1	Diodo laser, vermelho	1003201
1	Base em tonel 1000 g	1002834
1	Manga universal	1002830
1	Vara de apoio, 100 mm	1002932
<b>Adicionalmente recomendado</b>		
1	Calibrador, 150 mm	1002601
1	Balança eletrônica 5000 g	1003434

## FUNDAMENTOS GERAIS

Na medição das forças gravitacionais entre duas massas na experiência de laboratório, em princípio, todas as massas ambientes têm influência perturbadora. Na balança de torção de Cavendish, este problema é amplamente contornado, pois são realizadas duas medições com posições espelhadas das massas.

O cerne da balança de torção de Cavendish é um pêndulo de torção sensível apoiado sobre um par de pequenas esferas de chumbo. Estas são atraídas por um par de esferas grandes de chumbo. Daí, a posição das esferas grandes de chumbo determina a posição de equilíbrio do pêndulo de torção. Se as esferas grandes são levadas a uma segunda posição, em posição espelhada em relação à primeira relativamente às massas pequenas, o pêndulo de torção assume, após um procedimento de oscilação, uma nova posição de equilíbrio. A partir das duas posições de equilíbrio e das medições geométricas da disposição, pode-se definir a constante gravitacional. Nisto, o equilíbrio entre a força gravitacional e o torque de redefinição do fio de torção é decisivo.

A força gravitacional é dada por

$$(1) \quad F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

$G$ : constante gravitacional,

$m_1$ : massa de uma esfera pequena de chumbo,

$m_2$ : massa de uma esfera grande de chumbo,

$d$ : distância entre esfera de chumbo pequena e grande na posição de medição

Ela desvia o pêndulo de torção da posição zero quando as duas esferas grandes de chumbo se encontram na posição de medição. Para o torque desviante, vale

$$(2) \quad M_1 = 2 \cdot F \cdot r$$

$r$ : distância da esfera pequena de chumbo

em relação à suspensão da viga de suporte

Se o pêndulo de torção é desviado por um ângulo  $\varphi$ , age o torque de redefinição

$$(3) \quad M_2 = D \cdot \varphi$$

$D$ : grandeza de orientação angular do fio de tungstênio

do fio fino de tungstênio em que é pendurada a viga de suporte do pêndulo de torção. Na posição de equilíbrio,  $M_1$  e  $M_2$  se equivalem.

A grandeza de orientação angular  $D$  pode ser determinada a partir da duração da oscilação  $T$  com que o pêndulo de torção oscila ao redor de sua posição de equilíbrio.

$$(4) \quad D = J \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}$$

Nisto, o momento de inércia  $J$  é composto do momento de inércia  $J_1$  das duas esferas pequenas de chumbo e do momento de inércia  $J_k$  da viga de suporte

$$(5) \quad J = 2 \cdot m_1 \cdot r^2 + \frac{m_b}{12} \cdot (a^2 + b^2)$$

$m_b$ : massa da viga de suporte

$a, b$ : comprimento e largura da viga de suporte.

Para as duas esferas grandes de chumbo, são previstas duas posições espelhadas de medição, às quais pertencem dois ângulos de desvio  $\varphi$  e  $\varphi'$ , assim como dois torques desviantes, que são opostamente iguais. De (2) e (3) conclui-se, assim, no equilíbrio.

$$(6) \quad 4 \cdot F \cdot r = D \cdot (\varphi - \varphi') = D \cdot \Delta\varphi$$

Na experiência, as oscilações do pêndulo de torção são medidas com um sensor diferencial capacitivo, que suprime amplamente as partes de ruído e vibração do sinal. O fio de tungstênio do pêndulo de torção é selecionado tão fino que a duração da oscilação do pêndulo de torção está no âmbito de poucos minutos, de forma que dentro de uma hora possam ser

observadas múltiplas oscilações ao redor da posição de equilíbrio.

Um espelho afixado ao pêndulo de torção pode ser empregado para montagem de um indicador luminoso, que torne as oscilações rastreáveis a olho nu. Desta forma, o ajuste e a calibração necessários da balança de torção são significativamente facilitados.

## ANÁLISE

A partir das equações (1), (4), (5) e (6), obtém-se, após conversão:

$$G = \frac{\Delta\varphi}{m_2} \cdot \frac{d^2 \cdot \pi^2}{T^2} \cdot \left( 2 \cdot r + \frac{1}{12} \cdot \frac{m_b}{m_1} \cdot \frac{a^2 + b^2}{r} \right)$$

Nisto ainda não está considerado que cada uma das esferas pequenas de chumbo também é atraída pela esfera grande de chumbo mais distante e que, assim, o torque sobre o pêndulo de torção resulta um pouco menor que o calculado até então. Uma correção correspondente da equação (2) é facilmente possível, pois todas as distâncias são conhecidas.

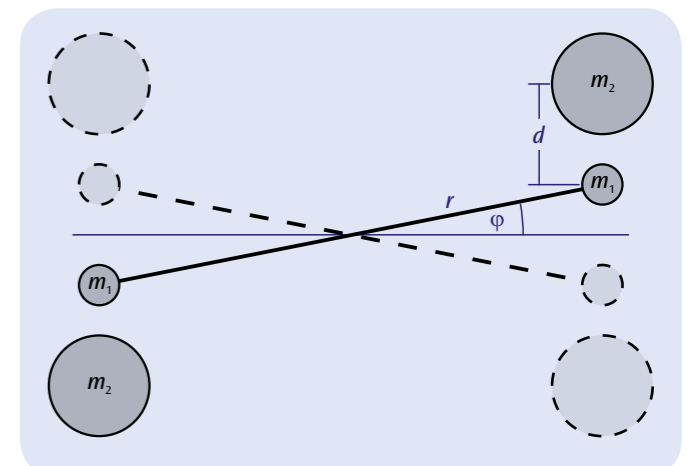


Fig. 1: Representação esquemática da disposição de medição na balança de torção de Cavendish

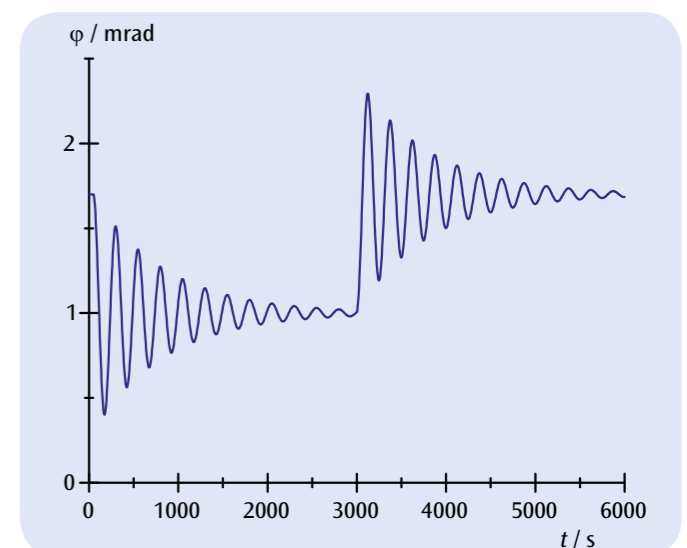


Fig. 2: Ângulo de desvio do pêndulo de torção em dependência do tempo com troca dupla da posição de medição para as esferas grandes de chumbo