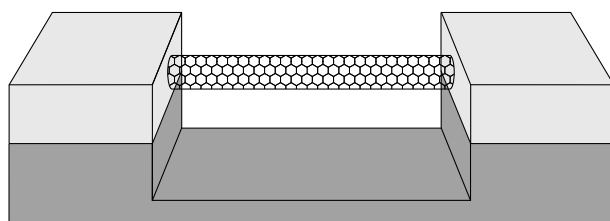


Protonenweegschaal?

Onderzoekers beweren dat ze een ‘weegschaal’ hebben ontwikkeld, die een enkel proton kan wegen. De weegschaal bestaat uit een nanobuisje dat aan twee zijden is vastgeklemd en trilt als een staande golf. Zie figuur 1. Deze figuur is niet op schaal. Als een deeltje aan het buisje vasthecht, verandert de trillingstijd. Hieruit is de massa van dat deeltje te bepalen.

Het nanobuisje is opgebouwd uit koolstofatomen die in een honingraatstructuur zijn geordend. Zie figuur 2. De massa van het vastgeklemd nanobuisje bedraagt $6,2 \cdot 10^{-22}$ kg.

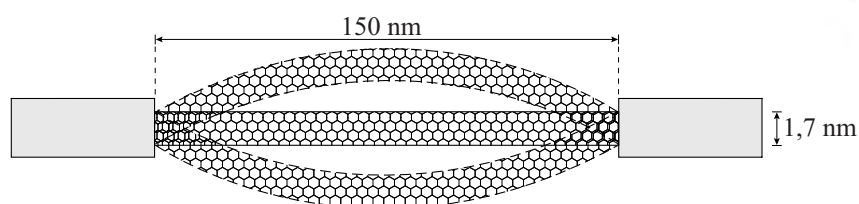
figuur 1



figuur 2



figuur 3



In figuur 3 staat de ‘weegschaal’ schematisch getekend met de bijbehorende afmetingen in de evenwichtsstand en de uiterste standen van de staande golf. Het buisje trilt met de grondfrequentie van 1,86 GHz.

3p 16 Bepaal de golfsnelheid in het nanobuisje.

Als één of meer deeltjes aan het nanobuisje vasthechten, verandert de resonantiefrequentie van het buisje. Voor de frequentieverandering stellen de onderzoekers de volgende formule op:

$$\Delta f = \frac{-\Delta m}{2m_{\text{nano}}} \cdot f_0$$

Hierin is:

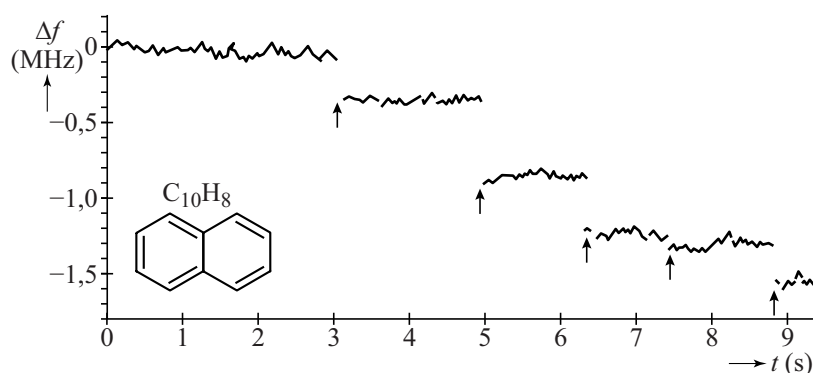
- f_0 grondfrequentie van het nanobuisje vóór vasthechten (in Hz);
- Δf de frequentieverandering ten opzichte van f_0 (in Hz);
- Δm de massa van de aangehechte deeltjes (in kg);
- m_{nano} de massa van het nanobuisje (in kg).

Uit de formule is op te maken dat de resonantiefrequentie afneemt als er één of meer deeltjes aan het nanobuisje vasthechten.

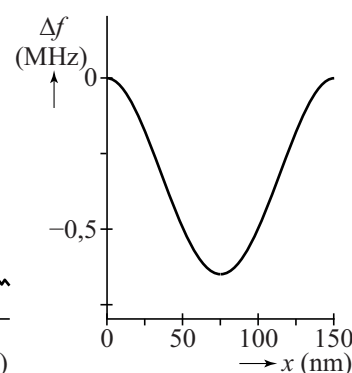
- 3p 17 Voer de volgende opdrachten uit:
- Geef aan hoe uit de gegeven formule volgt dat de resonantiefrequentie afneemt.
 - Leg uit of de golfsnelheid groter wordt, kleiner wordt of gelijk blijft als een deeltje vasthecht aan het nanobuisje.

Om de weegschaal te 'ijken' laat men eerst één molecuul en daarna meer moleculen naftaleen ($C_{10}H_8$) aan het buisje vasthechten. De massa van een molecuul naftaleen bedraagt 128 u. Gedurende een meettijd van ongeveer 10 seconde bepalen de onderzoekers een aantal keer per seconde Δf . De resultaten gaven zij weer in figuur 4. Met vijf pijlen zijn vijf momenten aangegeven waarop een extra naftaleenmolecuul vasthecht.

figuur 4



figuur 5



- 4p 18 Op tijdstip $t = 8,8$ s zijn er in totaal 5 naftaleenmoleculen vastgehecht. Laat zien of op dit tijdstip de gemeten Δf overeenkomt met de Δf die uit de formule volgt.

In figuur 4 is te zien dat niet alle stapjes in Δf even groot zijn. In figuur 5 staat de frequentieverandering Δf uitgezet tegen de positie x van één naftaleenmolecuul op het nanobuisje.

- 2p 19 Leg met behulp van figuur 5 uit waarom de stapjes van Δf in figuur 4 niet even groot zijn.

In figuur 4 is te zien dat de metingen van deze weegschaal 'ruis' hebben. Ruis is een continue (kleine) variatie in de waarden door meetonnauwkeurigheden. Zo is tot $t = 3$ s de waarde van Δf niet constant. Met deze 'weegschaal' willen de wetenschappers de massa bepalen van één enkel proton.

- 3p 20 Laat zien of de massa van één enkel proton met deze opstelling gemeten kan worden. Tip: bepaal hiertoe de nauwkeurigheid waarmee er gemeten moet worden om de massa van één enkel proton te kunnen bepalen.