

## Opgave 1 Vallend foton

Lees het volgende artikel.

### Lichtgewicht?

Een foton heeft geen rustmassa maar wel energie. Echter volgens de vergelijking van Einstein  $E=mc^2$  zijn massa en energie equivalente begrippen. Maar iets dat massa heeft, hoe gering ook, moet gevoelig zijn voor de zwaartekracht!

In 1960 slaagden de natuurkundigen Pound en Rebka erin dit idee van Einstein experimenteel te testen. Zij richtten  $\gamma$ -fotonen vanaf de top van de Harvard-toren naar de aarde. Tijdens deze val neemt de fotonenergie toe onder invloed van de zwaartekracht. Daarmee wordt ook de frequentie van de fotonen groter.

Deze minieme toename in de frequentie konden Pound en Rebka meten. Voor dit experiment is de extreme nauwkeurigheid van  $1:10^{15}$  vereist.



De toren van Harvard

- 2p 1 Voor de fotonen gebruikten Pound en Rebka  $\gamma$ -straling afkomstig van  ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ . Deze isotoop ontstaat bij een vervalreactie, waarbij  ${}^{57}_{27}\text{Co}$  een deeltje invangt. Geef de reactievergelijking van het ontstaan van  ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ .

- 2p 2 De gevormde  ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ -kern bevindt zich in een soort aangeslagen toestand en valt terug naar de grondtoestand onder uitzenden van de  $\gamma$ -straling, met een halveringstijd  $\tau = 9,8 \cdot 10^{-8}$  s. Voor het experiment is een voortdurende stroom  $\gamma$ -fotonen nodig. Leg uit dat de korte halveringstijd geen probleem is voor deze voortdurende stroom  $\gamma$ -fotonen.

Voor de frequentie  $f_g$  van de fotonen **op de grond** geldt:

$$hf_g = hf_h + E_z, \text{ waarin geldt } E_z = \frac{hf_h}{c^2} gH$$

Hierin is:

- $f_g$  de frequentie waarmee een foton de grond bereikt;
- $f_h$  de frequentie waarmee een foton in de top van de toren wordt uitgezonden;
- $E_z$  de zwaarte-energie van een foton;
- $h$  de constante van Planck;
- $H$  de hoogte van de toren:  $H = 22,6$  m;
- $g$  de valversnelling;
- $c$  de lichtsnelheid.

3p **3** Leid de uitdrukking voor  $E_z$  af.

De nauwkeurigheid van het experiment moet zo groot zijn, omdat de verandering in de fotonenergie tijdens de val erg klein is. De verhouding tussen  $E_z$  en de oorspronkelijke fotonenergie bepaalt namelijk hoe groot de nauwkeurigheid in dit experiment moet zijn.

4p **4** Bereken deze verhouding bij dit experiment.