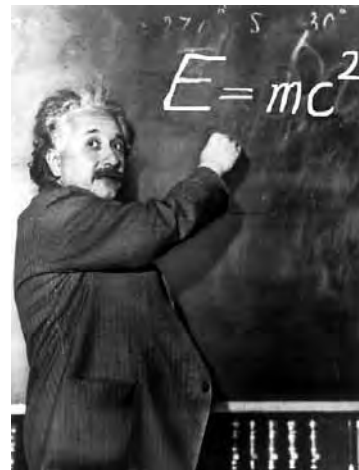


### Opgave 3 Formule van Einstein

Lees onderstaand artikel.

Amerikaanse en Europese wetenschappers hebben in 2005 in een gezamenlijk project de juistheid van de beroemde formule van Einstein  $E = mc^2$  onderzocht. Ze gingen uit van de reactie waarbij Si-28 een neutron invangt. Hierbij ontstaat Si-29 en komen twee gamma-fotonen vrij. Volgens de formule van Einstein zou de energie van de twee fotonen samen overeen moeten komen met het massaverschil voor en na de reactie. In **Boston (USA)** werd het massaverschil bepaald en in **Grenoble (Frankrijk)** de golflengtes van beide fotonen. Beide metingen werden met zeer grote nauwkeurigheid verricht. De wetenschappers hebben hiermee de juistheid van de formule van Einstein met een nauwkeurigheid van één op tien miljoen aangetoond.



Op het Massachusetts Institute of Technology in **Boston (USA)** werd het massaverschil van Si-28 en Si-29 bepaald via een frequentiemeting. De atomen werden eerst éénmaal geïoniseerd, vervolgens versneld en daarna in een homogeen magnetisch veld gebracht. De snelheid van de  $Si^+$ -ionen stond loodrecht op de richting van het magnetisch veld. Hierdoor kwamen beide ionen in een cirkelbaan.

- 2p **13** Leg uit waarom de baan van de ionen cirkelvormig is.

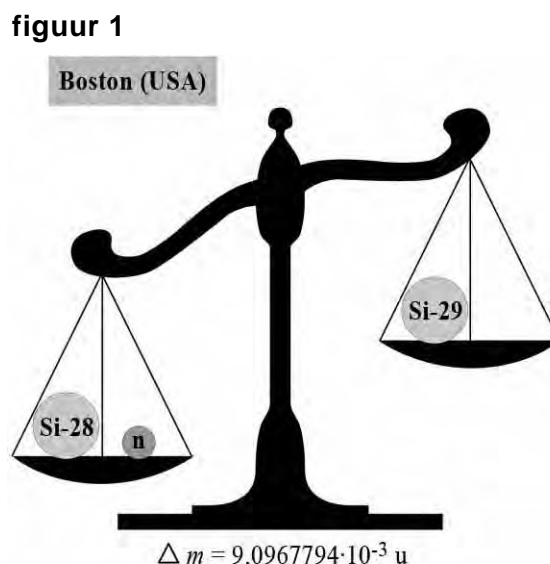
De onderzoekers konden gedurende een half jaar heel nauwkeurig de frequenties meten waarmee de ionen ronddraaiden. De frequentie  $f$  waarmee een ion met lading  $q$  ronddraait in een magneetveld met sterkte  $B$  hangt af van zijn massa  $m$  en niet van zijn snelheid en de straal van de cirkel:  $f = \frac{Bq}{2\pi m}$ .

- 3p **14** Leid deze formule af uit formules in Binas.

De waarde van  $B$  was 8,5 T.

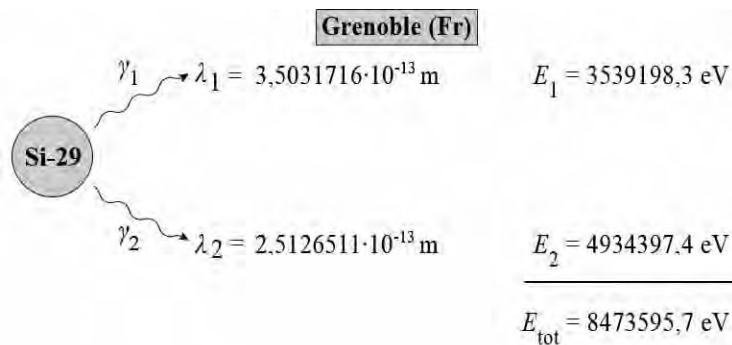
- 2p **15** Bereken voor één van de ionen de frequentie waarmee hij ronddraaide.

Omdat de massa van het neutron precies bekend was, konden de Amerikaanse onderzoekers uit de metingen van de frequenties het massadefect exact bepalen. Dit eindresultaat is in figuur 1 weergegeven.



Onderzoekers van het Institut Laue-Langevin in **Grenoble (Frankrijk)** beschikken over een spectrometer om zeer nauwkeurig de golflengte van gamma-fotonen te bepalen. De gammastraling die vrijkomt bij de invangreactie werd door hen gemeten. In figuur 2 staan de resultaten weergegeven. Bij elk foton is ook de energie ervan berekend.

figuur 2



Omdat de waarden in BINAS niet nauwkeurig genoeg zijn, staan in de tabel hieronder waarden van enkele constanten en grootheden die je moet gebruiken bij de volgende twee vragen.

Lichtsnelheid	$c = 2,997\,924\,6 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Constante van Planck	$h = 6,626\,069\,0 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
Elementair ladingskwantum	$e = 1,602\,176\,5 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Atomaire massa-eenheid	$u = 1,660\,538\,8 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

- 3p **16** Laat zien dat de berekende energie  $E_1$  van het eerste gamma-foton  $\gamma_1$  overeenkomt met de gemeten golflengte  $\lambda_1$ .  
Hint: bereken eerst de frequentie van het foton.

In de laatste zin van het artikel wordt een bewering gedaan over de nauwkeurigheid.

- 3p **17** Ga met een berekening uitgaande van de gegevens in de figuren 1 en 2 na of met de experimenten de formule van Einstein met een nauwkeurigheid van één op tien miljoen is aangetoond.

In één van de genoemde wetenschappelijke instituten hadden de onderzoekers een neutronenbron nodig om hun experiment uit te kunnen voeren.

- 2p **18** Leg uit in welk instituut dat was.