

## KERNEN & DEELTJES – VWO

Foton is een opgavenverzameling voor het nieuwe eindexamenprogramma natuurkunde.

Foton is gratis te downloaden via [natuurkundeuitgelegd.nl/foton](http://natuurkundeuitgelegd.nl/foton)

Uitwerkingen van alle opgaven staan op [natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen](http://natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen)

Videolessen over de theorie zijn te vinden op [natuurkundeuitgelegd.nl/videolessen](http://natuurkundeuitgelegd.nl/videolessen)

Theorie bij dit hoofdstuk strekt zich uit over alle onderwerpen. Bij de meeste opgave zit een inleiding die voldoende uitleg bevat om de opgave te kunnen maken. Daarnaast zijn er enkele videolessen die specifiek bij dit keuzeonderwerp horen:

[Massaverschil & energie](#)

[Kernsplijting](#)

[Uraniumverrijking](#)

[Bindingsenergie](#)

[Toepassingen kernsplijting](#)



“Kernen & Deeltjes” is als **keuzeonderwerp** onderdeel van het VWO schoolexamen.

Voor dit onderwerp is geen gedetailleerde landelijke stofomschrijving. Precieze invulling kan van school tot school verschillen

### 1 Einstein

Albert Einstein heeft in zijn speciale relativiteitstheorie gesteld dat massa en energie equivalent aan elkaar zijn volgens onderstaande formule.

- De zon heeft een uitgestraald vermogen van  $3,85 \cdot 10^{26}$  W. Bereken met behulp van de formule van Einstein hoeveel kg de zon in de loop van een dag lichter wordt.
- Het totale energieverbruik van Nederland bedraagt 3300 PJ per jaar (alle verbruikte aardgas, benzine, elektriciteit en andere energievormen samen). Stel dat het technisch mogelijk was om massa direct in energie om te zetten. Hoeveel massa zou er per dag moeten worden omgezet om in de Nederlandse energiebehoefte te kunnen voorzien?
- Bij verval van radioactieve isotopen neemt de totale de massa van atoomkernen een klein beetje af. Een hoeveelheid radioactief materiaal van 2,5 kg vervalt met een activiteit van 2300 Bq. Per vervallen kern komt er een energie van 4,13 MeV vrij die ervoor zorgt dat het materiaal opwarmt én lichter wordt. Bereken hoeveel gram het materiaal lichter wordt in de loop van een jaar. Ga er hierbij vanuit dat de activiteit constant is gedurende dit jaar.

$$E = m \cdot c^2$$

E = energie (J)

m = massa (kg)

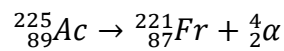
c =  $2,99792458 \cdot 10^8$  ms<sup>-1</sup> (zie BINAS tabel 7)

## 2 Massaverschil

Let op: in BINAS tabel 25A staat de atoommassa en niet de kernmassa.

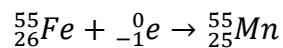
Hieronder staat de vervalreactie van actinium-225. Bij het verval ontstaat de stof francium-221 en een  $\alpha$ -deeltje.

- Hoe groot is de massa van de kern aan de linkerkant uitgedrukt in u?
- Hoe groot is de totale massa van de twee kernen aan de rechterkant uitgedrukt in u?
- Bereken het massaverschil tussen links en rechts in u.
- De verdwenen massa is omgezet in energie. Bereken hoeveel energie is vrijgekomen bij de vervalreactie. Reken het massaverschil hiervoor eerst om naar kg.
- In BINAS tabel 25A is in de laatste kolom te zien dat de energie van het vrijkomende  $\alpha$ -deeltje 5,8 MeV is. Laat zien dat dit lager is dan het antwoord op vraag d.
- Waar is de rest van de energie gebleven?



## 3 K-vangst

Een zeldzame vorm van verval is K-vangst. Hierbij wordt geen deeltje door de kern uitgezonden maar juist opgenomen. Een elektron uit de schil die het dichtst bij de kern ligt wordt hierbij ingevangen door de kern. Hieronder staat de vervalvergelijking van ijzer-55 dat via K-vangst vervalt. Net zoals bij andere vervalsoorten is de massa aan de linkerkant kleiner dan aan de rechter kant en komt er dus energie vrij bij de reactie. Bepaal hoeveel energie er vrijkomt bij het verval van één kern Fe-55.



## 4 Vervalsoort

De radioactieve isotoop Ni-63 vervalt via  $\beta^-$ -verval en niet via een andere vervalsoort. Dit kunnen we ook afleiden uit de massa's van de mogelijk vervalproducten. Spontaan verval treedt namelijk alleen op als de totale massa kleiner wordt. In de tabel staan de theoretisch mogelijke vervalproducten van Ni-63 met daarbij de massa's. Laat aan de hand van een vergelijking van de totale massa's voor en na zien dat  $\beta^-$ -verval de enige vervalsoort in het rijtje is die qua energie mogelijk is.

Mogelijk vervalsoort	Vervalproduct	Atoommassa (u)
$\alpha$	Fe-59	58,93488
$\beta^-$	Cu-63	62,92960
$\beta^+$	Co-63	62.93361
Atoommassa van Ni-63 is 62,92967 u		

## 5 Bindingsenergie

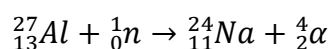
De kern van Fe-56 bestaat uit 26 protonen en 30 neutronen. Ondanks het feit dat protonen positief geladen zijn en elkaar onderling afstoten zitten ze toch op een kluitje bij elkaar.

De deeltjes hebben bij elkaar een lagere energie dan los.

- Hoe wordt het verschil in energie genoemd tussen gebonden kerndeeltjes en losse kerndeeltjes?
- Bepaal de totale massa die de protonen en neutronen in de kern zouden hebben als ze als losse protonen en neutronen zouden bestaan. Gebruik hiervoor de massa's van losse protonen en neutronen in BINAS tabel 7.
- Bereken de totale bindingsenergie van Fe-56. Bepaal hiervoor eerst de massa van een Fe-56 kern aan de hand van BINAS tabel 25A.
- Wanneer we de bindingsenergieën van verschillende atoomsoorten vergelijken zullen atomen met veel kerndeeltjes altijd een hogere totale bindingsenergie hebben dan atomen met weinig kerndeeltjes. Om goed te kunnen vergelijken kijken we daarom naar de bindingsenergie per kerndeeltje. Deze blijkt voor vrijwel alle atoomsoorten beneden de 8,7 MeV per kerndeeltje te liggen. Fe-56 is wat dit betreft een uitzondering. Bereken de bindingsenergie per kerndeeltje van Fe-56 en laat zien dat deze boven de 8,7 MeV ligt.
- Stel dat je een grote hoeveelheid losse protonen en neutronen hebt. Wat zou, energetisch gezien, de meest gunstige configuratie zijn?
- Je zou kunnen zeggen dat Fe-56 van alle isotopen van alle stoffen de meest stabiele isotoop is die er bestaat. Leg uit waarom.

## 6 Kunstmatige reactie

In laboratoria kunnen sommige kernreacties kunstmatig opgewekt worden door deeltjes op elkaar te laten botsen. Als aluminium bijvoorbeeld wordt bestraald met neutronen treedt onderstaande reactie op waarbij Na-24 en een  $\alpha$ -deeltje ontstaan. Net zoals bij vervalvergelijkingen is het massa- en ladingsgetal aan beide kanten van de vergelijking gelijk.



Bepaal door het opstellen van de reactievergelijking welke deeltje in onderstaande situatie ontstaan.

- Als Li-6-kernen worden beschoten met neutronen ontstaat He-4 en...
- Als Al-27 kernen worden beschoten met  $\alpha$ -deeltjes ontstaat een proton en ...
- Als N-14-kernen worden beschoten met  $\alpha$ -deeltjes ontstaat O-15 en ...
- Als een Li-7-kern wordt beschoten valt deze uiteen in twee helium-4 kernen. Met welke deeltjes moet de lithium-7-kern hiervoor beschoten worden?

## 7 Splitsingsreactie

Als een uranium-235 kern wordt getroffen door een neutron ontstaat een uranium-236 kern die vrijwel meteen splijt in twee middelgrote kernen plus een aantal neutronen. Bij deze laatste reactie komt ook veel energie vrij. Bepaal voor elk van onderstaande splitsingsreacties hoeveel nieuwe neutronen er vrijkomen.

- a  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{40}^{94}\text{Zr} + {}_{52}^{139}\text{Te} + \dots$
- b  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{38}^{94}\text{Sr} + {}_{54}^{140}\text{Xe} + \dots$
- c  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{36}^{90}\text{Kr} + {}_{56}^{143}\text{Ba} + \dots$

## 8 Kernenergie

Hieronder staan een aantal beschrijvingen van termen die met kernsplijting en kernenergie te maken hebben. Vul in welke term bij elke beschrijving hoort. Kies uit: 239, 235, verrijking, cadmium/boor, vermenigvuldigingsfactor ( $K$ ), moderator, kettingreactie

	Beschrijving
	Materialen die goed neutronen absorberen
	Massagetal van splijtbare uraniumisotoop
	Massagetal van splijtbare plutoniumisotoop
	Aantal nieuwe splijtingen als resultaat van een splijting
	Materiaal wat snelle neutronen afremt.
	Verhogen van het percentage splijtbare isotopen
	Reactie die leidt tot een volgende reactie

## 9 Spleijstof

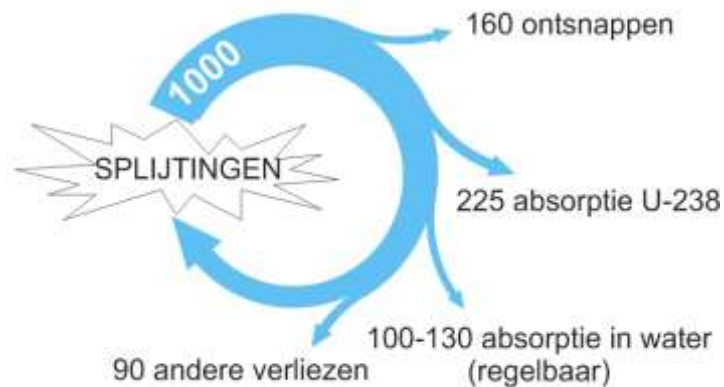
Als spleijstof in een kernreactor wordt uranium-235 gebruikt. De kern hiervan splijt als er een neutron wordt ingevangen. Hierbij ontstaan twee nieuwe kernen en een aantal nieuwe neutronen. Bij een bepaalde splijting ontstaan twee nieuwe neutronen en is barium-147 een van de spleijtingsproducten.

- a Geef de reactievergelijking van deze spleijtingsreactie.
- b De totale massa van de spleijtingsproducten is kleiner dan de totale massa vóór de spleijting. Gemiddeld bedraagt dit massaverschil 0,21 u per reactie. Het gemiddelde vermogen wat zo wordt opgewekt in een kerncentrale bedraagt 1,8 GW. Bereken hoeveel kilogram uranium-235 hierbij per jaar wordt verbruikt.
- c Gemiddeld ontstaan er per spleijting 2,50 nieuwe neutronen. Een kernreactor bevat regelstaven om in noodgevallen snel neutronen te kunnen absorberen. Voor het regelen van de kettingreactie gebruikt men niet de regelstaven maar water met daarin opgelost boorzuur. In de afbeelding hieronder is dit schematisch weergegeven. Om het proces inzichtelijk te maken is uitgegaan van 1000 nieuwe neutronen. Deze 1000 nieuwe neutronen zijn lang niet allemaal beschikbaar om een nieuwe spleijting te veroorzaken. De getallen in het schema geven aan welke verliezen er optreden. Het neutronenverlies in

het water wordt binnen de aangegeven grenzen geregeld door meer of minder boorzuur aan het water toe te voegen. Het element boor is namelijk een sterke neutronen-absorbeerder. Bepaal de waarde van de 'absorptie in het water' om de reactor in kritische toestand te laten werken.

d Het water in de kernreactor vervult onder andere de functie van moderator. Een moderator is nodig om neutronen die een zeer grote energie hebben af te remmen, omdat alleen langzame neutronen worden geabsorbeerd in uranium-235. Het afremmen van de neutronen gebeurt door botsingen met de atoomkernen in de moderator. Hieronder staat een aantal eigenschappen van water. Leg bij elke eigenschap uit of dit water geschikt maakt als moderator

- Water heeft een relatief kleine dichtheid
- Water bevat waterstofkernen
- Water bevat zuurstofkernen
- (Zuiver) water is een slechte geleider
- Water absorbeert slecht neutronen
- Water is doorzichtig voor zichtbaar licht



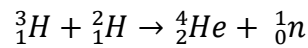
## 10 Kernfusie

Een andere manier om energie te winnen uit kernreacties is het laten samensmelten van licht atoomkernen. Dit is ook wat er in het binnenste van de zon gebeurt: Waterstofkernen smelten samen tot heliumkernen waarbij energie vrijkomt. Ook op aarde wordt geprobeerd om door kernfusie energie te winnen. Dit wordt gedaan door bij extreem hoge temperatuur de waterstofisotopen deuterium ( $^2\text{H}$ ) en tritium ( $^3\text{H}$ ) te laten fuseren. Wanneer de temperatuur hoog genoeg is treedt onderstaande fusiereactie op.

- Waarom is fusie van deuterium en tritium alleen mogelijk bij extreem hoge temperatuur?
- Bij de fusie komt 17,6 MeV aan energie vrij. Laat dit zien met een berekening.
- De grondstoffen die nodig zijn voor kernfusie zijn deuterium en tritium. Deuterium is een stabiele waterstofisotoop die gewoon in de natuur voorkomt maar tritium komt niet in de natuur voor en moet gemaakt worden. In een fusiereactor wordt dit gedaan door handig gebruik te maken van het neutron wat vrijkomt bij de fusiereactie. Door dit neutron te

laten botsen met lithium-6, wat in de wanden van de reactor is verwerkt, wordt ervoor gezorgd dat er nieuwe tritiumkernen worden gevormd. Geef de reactievergelijking waarbij tritium en nog een ander deeltje gevormd worden.

- d Een stad verbruikt in een jaar tijd  $2,0 \cdot 10^{15}$  J aan elektriciteit. Bereken hoeveel kg deuterium en tritium een fusiereactor zou verbruiken om deze stad een jaar lang van elektriciteit te voorzien

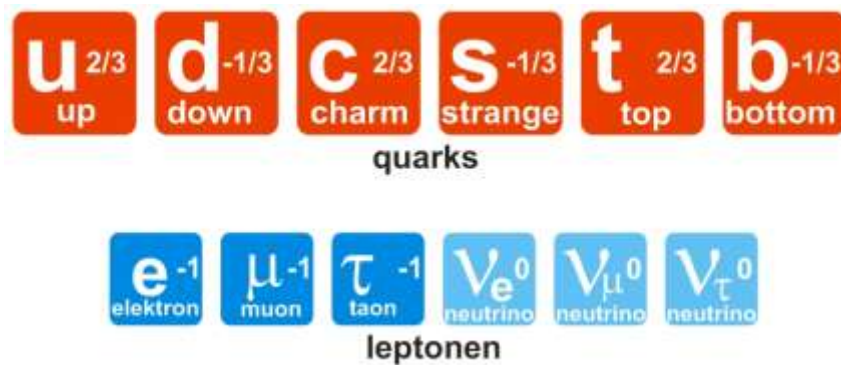


## 11 Standaardmodel

Het standaardmodel beschrijft hoe deeltjes zijn opgebouwd. Volgens het standaardmodel kunnen de deeltjes waaruit materie is opgebouwd in twee groepen worden opgedeeld:

- Hadronen die zelf ook weer zijn opgebouwd uit nog kleinere deeltjes: quarks
- Leptonen die op zichzelf kunnen bestaan en niet verder zijn op te delen.

De kleinste deeltjes waaruit iets is opgebouwd worden *elementaire deeltjes* genoemd. In de afbeelding hieronder staan de elementaire deeltjes bij elkaar gerangschikt. Het getal bij elk deeltje geeft de lading weer. In BINAS tabel 26C staat hoe de verschillende hadronen zijn opgebouwd. Het bovenste gedeelte bevat de deeltjes die uit twee quarks zijn opgebouwd, het onderste gedeelte de deeltjes die uit drie quarks zijn opgebouwd. Leg aan de hand van deze tabel uit waarom elektronen wél elementaire deeltjes zijn maar protonen en neutronen niet.



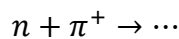
## 12 Quarks

Deeltjes die uit nog kleinere deeltjes zijn opgebouwd worden *hadronen* genoemd. Ze bestaan uit meerdere *quarks*. In BINAS tabel 26A staan de zes verschillende soorten quarks weergegeven in rood en roze met hun eigenschappen. BINAS tabel 26C staat hoe verschillende deeltjes zijn samengesteld uit quarks. Deeltjes bestaande uit twee quarks heten *mesonen* en deeltjes bestaande uit drie quarks heten *baryonen*.

- a Bestaat de materie om ons heen uit mesonen of uit baryonen?
- b In tabel 26C is te zien dat de samenstelling van een proton *uud* is : twee 'up'-quarks en één 'down'-quark. Ga na dat de lading van het proton +1 is. (Pas op: de lading van het

'up'-quark staat fout in BINAS: Dit moet  $\frac{2}{3} e$  zijn)

- c Bij alle processen waarbij deeltjes botsen, vervallen of ontstaan blijft het aantal quarks behouden. Quarks kunnen dus nooit zomaar verdwijnen of ontstaan. Wel kan een quark tegelijkertijd met zijn antideeltje ontstaan of verdwijnen. Van alle quarks bestaan namelijk ook antiquarks met tegengestelde lading aangeduid een streepje erboven. Bijvoorbeeld: het antiquark van een "charm" wordt "anticharm" genoemd en weergegeven met het symbool  $\bar{c}$ . Hieronder staat een reactie waarbij een neutron en een pion ( $\pi^+$ ) samenkomen. Voorspel aan de hand van de samenstelling van beide deeltjes welk deeltje er zal ontstaan.

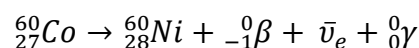


- d Bij het verval van een  $\Sigma_c^{++}$ -deeltje ontstaat een  $\Lambda_c^+$ -deeltje en een ander deeltje. De samenstelling van een  $\Sigma_c^{++}$ -deeltje is  $uuc$  en die van een  $\Lambda_c^+$ -deeltje  $udc$ . Bepaal welk deeltje er nog meer ontstaat als je ervan uitgaat dat het totaal aantal quarks van iedere soort gelijk blijft.
- e Er is experimenteel vastgesteld dat ook het aantal *baryonen* behouden blijft bij een reactie. Ga na dat in de twee vervalvergelijkingen dit inderdaad sprake is van baryonbehoud.

### 13 Leptonen

Leptonen zijn de kleinste deeltje die bestaan. Ze bestaan niet uit quarks maar vormen op zichzelf een deeltje. In BINAS tabel 26A staan de leptonen in blauw weergegeven: Het bekendste lepton is het elektron. Er zijn twee andere leptonen met een elektrische lading -1: het veel zwaardere *muon*, en het nog veel zwaardere *tauon*. Bij elk van deze drie deeltjes hoort ook een *neutrino*. Van alle leptonen bestaat ook een antideeltje.

- a Hoeveel verschillende leptonen bestaan er?
- c In de kern- en deeltjesfysica geldt er, behalve behoudt van massagetal en ladinggetal, ook een behoud van *leptongetal*. Het leptongetal geeft aan hoeveel leptonen er zijn. Gewone leptonen tellen als 1, antideeltjes tellen als -1. Hieronder staat de vervalvergelijking van Kobalt-60. Laat zien dat het leptongetal links en rechts gelijk is. (Een streepje boven een symbool is een aanduiding dat het om een antideeltje gaat)



- c Leg aan de hand van de wet van behoud van leptongetal uit waarom er bij  $\alpha$ -verval geen neutrino vrijkomt.
- d Reden dat neutrino's veel later ontdekt zijn dan andere deeltjes is dat neutrino's extreem moeilijk te detecteren omdat ze vrijwel overal dwars doorheen vliegen. Leg uit hoe dit komt.

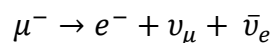
## 14 Zonneneutrino's

In de zon wordt door kernfusie helium gevormd uit waterstof. De eerste stap in dit proces bestaat uit fusie van twee protonen, waarbij een positron ( $e^+$ ), een deuteriumkern ( ${}^2\text{H}$ ) en een neutrino ( $\nu_e$ ) worden gevormd.

- Geef de reactievergelijking van deze fusie.
- Het proces gaat verder en na een aantal stappen ontstaat uiteindelijk een  ${}^4\text{He}$ -kern. Bij het hele proces worden netto vier protonen en twee elektronen omgezet in een  ${}^4\text{He}$ -kern en twee neutrino's ( $\nu_e$ ). Bereken hoeveel energie er in totaal per gevormde heliumkern vrijkomt. Neem daarbij aan dat de neutrino's geen massa hebben.
- De zonkant van onze planeet wordt permanent getroffen door een bombardement van zonneneutrino's. Elke seconde worden er door de zon  $2,0 \cdot 10^{38}$  neutrino's uitgezonden. De neutrino's worden in alle richtingen uitgezonden en worden onderweg in de ruimte niet tegengehouden. Bereken het aantal neutrino's dat per seconde de aarde treft.

## 15 Kosmische straling

De aarde staat continu bloot aan kosmische straling. Deze bestaat uit neutrino's, hoogerenergetische gammafotonen en geladen deeltjes afkomstig van de zon en andere objecten in het heelal. De neutrino's gaan ongehinderd de aardatmosfeer door maar bij botsingen tussen geladen deeltjes met atomen in onze dampkring ontstaan onder andere *muonen*. Een muon kan gezien worden als het zware broertje van het elektron. Net als een elektron heeft het lading  $-1$  en behoort het tot de *leptonen* (zie BINAS tabel 26A blauwe gedeelte). Het muon is instabiel en vervalft kort na zijn ontstaan op onderstaande manier:



- Bij het verval ontstaan, naast een elektron, een neutrino ( $\nu_\mu$ ) en een antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ). Normaal gesproken annihileren een deeltje en een antideeltje elkaar waarbij er fotonen ontstaan. Leg uit waarom dit in dit geval niet gebeurt.
- Onder invloed van kosmische straling worden ook *antimuonen* gevormd. Het antimuon is het antideeltje van het muon met een tegengestelde lading en verder dezelfde eigenschappen als het muon (notatie:  $\mu^+$ ). Ook het antimuon is instabiel. Bij het verval ontstaan o.a. een positron (notatie  $e^+$ ). Geef de complete vervalvergelijking van het antimuon.
- In tegenstelling tot het muon en het antimuon is het positron stabiel. Toch zal het kort na zijn ontstaan verdwijnen. Leg uit waarom.

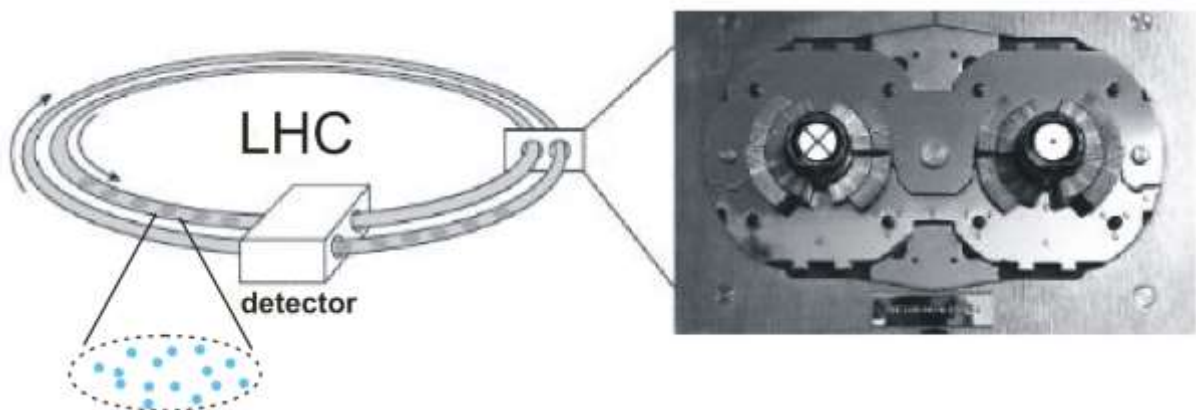
## 16 LHC

De Large Hadron Collider (LHC) is een ondergrondse deeltjesversneller bij CERN in Genève met een diameter van 8,4858 km waarin protonen versneld worden tot bijna de



lichtsnelheid. De LHC bestaat uit een ondergrondse ring met daarin twee dicht naast elkaar gelegen cirkelvormige buizen. (zie afbeelding hieronder) In de twee buizen gaan twee bundels protonen rond in tegengestelde richting. Als ze door het versnellen voldoende kinetische energie hebben gekregen, laten de wetenschappers de protonen in een detector tegen elkaar botsen. Tijdens de botsing worden nieuwe deeltjes gevormd.

- Voordat de protonen in de ring van de LHC binnenkomen, worden ze eerst in een lineaire versneller versneld. (Deze versneller is niet te zien in de figuur) Daarbij doorlopen de protonen een groot aantal malen een elektrische spanning van 5,0 kV. Bereken hoe vaak de protonen deze spanning moeten doorlopen om een snelheid van  $1,2 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$  te krijgen als ze vanuit stilstand versneld worden.
- De protonen worden in twee bundels gesplitst voordat ze in de twee ringen versneld worden tot een kinetische energie van 7,0 TeV. Volgens de relativiteitstheorie is de snelheid die bij deze energie hoort zodanig dat de protonen 11245 maal per seconde de ring doorlopen. Laat met een berekening zien dat de snelheid slechts 0,004 % onder de lichtsnelheid ligt..
- In de ring bevinden zich twee buizen waarin de protonen in tegengestelde richting bewegen. Dit is schematisch weergegeven in de afbeelding. In de rechterafbeelding zie je een foto van de dwarsdoorsnede bij punt A. De protonen worden in de buizen in een cirkelbaan gehouden door sterke elektromagneten om de buizen. Er is aangegeven dat de protonen in de rechterbuis naar je toe bewegen (rondje met puntje) en in de linkerbuis van je af (rondje met kruisje). Teken in de afbeelding de richtingen van de magneetvelden in elke buis afzonderlijk.
- De protonen gaan in groepjes door de buizen. Dit is schematisch weergegeven in de afbeelding. In één buis bewegen 2808 groepjes protonen. Hierdoor is in die buis de stroomsterkte gelijk aan 0,582 A. Bereken hoeveel protonen er in één groepje zitten.
- In de detector laten de wetenschappers de bundels elkaar snijden. Als twee protonen op elkaar botsen, kunnen nieuwe elementaire deeltjes ontstaan. De wetenschappers hopen hier het Higgs-deeltje te vinden. Een schatting stelt dat de massa van het Higgs-deeltje in de orde van grootte van  $10^{-25} \text{ kg}$  is. Laat met een berekening zien of de kinetische energie van de twee botsende protonen genoeg is om een Higgs-deeltje te laten ontstaan.



## ANTWOORDEN VAN DE REKENOPGAVEN

Uitwerkingen en uitleg van alle opgaven zijn te vinden op

[natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen](http://natuurkundeuitgelegd.nl/uitwerkingen)

### 1 Einstein

- a  $3,70 \cdot 10^{14}$  kg
- b 100,6 g
- c  $5,34 \cdot 10^{-16}$  g

### 2 Massaverschil

- a 224,97440 u
- b 224,96803 u
- c  $6,37 \cdot 10^{-3}$  u
- d  $9,50 \cdot 10^{-13}$  J

### 3 K-vangst

- a  $3,7 \cdot 10^{-14}$  J / 0,23 MeV

### 5 Bindingsenergie

- b 56,44913562 u
- c 492,25 MeV
- d 8,7902 MeV

### 6 Kunstmatig

- a H-3 (tritium)
- b Si-30
- c H-3 (tritium)
- d protonen

### 7 Splitsingsreactie

- a 3 neutronen
- b 2 neutronen
- c 3 neutronen

### 9 Spleijstof

- b  $7,1 \cdot 10^2$  kg
- c 125 neutronen

### 10 Kernfusie

- d 5,9 kg

### 12 Quarks

- a baryonen
- c proton ( $p^+$ )
- d  $\pi^+$ -deeltje

### 13 Leptonen

- a 12

### 14 Zonneneutrino's

- b 26,73 MeV
- c  $9,1 \cdot 10^{28}$  neutrino's

### 16 LHC

- a  $1,5 \cdot 10^2$  keer
- d  $1,15 \cdot 10^{11}$  protonen