



## 1 Hadronen

**Opdracht 1:** Elementaire deeltjes worden onderverdeeld in quarks en leptonen.

- (a) Noem twee eigenschappen die quarks en leptonen met elkaar gemeen hebben.

**Antwoord:** Ze hebben beide spin  $\frac{1}{2}$ . Ze zijn beide elementair, d.w.z. niet verder deelbaar.

- (b) Noem twee eigenschappen waarin quarks en leptonen van elkaar verschillen.

**Antwoord:** Quarks vormen samen hadronen. Leptonen hebben geen 'kleur'. Quarks hebben een fractionele lading.

**Opdracht 2:** Wanneer twee quarks combineren, dan richten de spins zich 'parallel' of 'tegengesteld'.

- (a) Beredeneer dat de quarks in een pion met tegengestelde spin zijn gecombineerd.

**Antwoord:** Pionen zijn mesonen en bestaan dus uit twee quarks. Elk quark heeft een spin + of -  $\frac{1}{2}$ . Combinaties van twee spins kunnen dus opleveren spin +1, -1 of 0. Het pion heeft een spin van 0. Dus in het pion moeten de quarks spin  $-\frac{1}{2}$  en  $+\frac{1}{2}$  hebben.

- (b) Beredeneer de manier waarop de 3 quarks in een neutron hun spins hebben gericht.

**Antwoord:** Een neutron is opgebouwd uit 3 quarks. Als we de spins bij elkaar optellen, kan dat dus opleveren  $-1\frac{1}{2}$ ,  $-\frac{1}{2}$  en  $+\frac{1}{2} + 1\frac{1}{2}$ .

**Opdracht 3:** Samengestelde deeltjes ("hadronen") worden onderverdeeld in mesonen en baryonen.

- (a) In welk opzicht zijn mesonen anders van samenstelling dan baryonen? Leg uit.

**Antwoord:** Mesonen bestaan uit twee quarks en hadronen bestaan uit drie quarks.

- (b) Komen er in de natuur mesonen voor met een massa groter dan die van een baryon? Zo ja, welke.

**Antwoord:** Ja, bijvoorbeeld het D meson heeft een grotere rustmassa dan het neutron of het proton.

- (c) Komen er in de natuur mesonen voor met een negatieve lading?

**Antwoord:** Ja, bijvoorbeeld  $\pi^-$ -meson.

**Opdracht 4:** Alle deeltjes hebben een anti-deeltje.

- (a) Welke deeltjes uit BINAS-26 zijn identiek aan hun eigen antideeltje?

**Antwoord:** Fotonen,  $\pi^0$  en het majorana-deeltje.

- (b) Noem drie redenen waarom het proton niet het antideeltje van het  $\pi^+$ -meson kan zijn.

**Antwoord:** Een proton bestaat uit drie quarks, het  $\pi^+$  uit twee. Het proton en het  $\pi^+$  hebben beide een + lading. Het proton is een baryon en heeft daardoor een halftallige spin, een meson heeft een heeltallige spin.

**Opdracht 5:** Een  $K^+$ -deeltje bestaat uit een u-quark ('up') en een  $\bar{s}$ -quark ('anti-strange'), schematisch weergegeven als  $K^+ = [u \bar{s}]$ .

- (a) Is het  $K^+$ -deeltje een meson of een baryon?

**Antwoord:** Het  $K^+$  bestaat uit twee quarks en is dus een meson.

- (b) Beredeneer hoe een  $K^-$ -deeltje moet zijn opgebouwd.

**Antwoord:** Uit een  $\bar{u}$ -quark ('anti-up') en een s-quark. Door het antideeltje te nemen van de aanwezige quarks is de lading van het  $K^-$ -deeltje dus negatief geworden.

**Opdracht 6:** Het  $\pi^+$ -meson bestaat uit de quarks u en  $\bar{d}$  ('up' en 'anti-down') en is positief geladen.

- (a) Bereken dat de lading van een  $\pi^+$ -meson gelijk is aan +1e.

**Antwoord:** Het up-quark heeft lading  $\frac{2}{3}$  en de lading van het down quark is  $-\frac{1}{3}$ , de lading van het antidown quark ( $\bar{d}$ ) is  $+\frac{1}{3}$ . De lading van het  $\pi^+$  is dus:  $\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = 1$ .

- (b) Leg uit dat een  $\Sigma^+$ -deeltje niet een quarkcombinatie  $[s d d]$  kan zijn.

**Antwoord:** Als je de ladingen van deze quarks optelt krijg je -1. Het  $\Sigma^+$  deeltje heeft lading +1.

**Opdracht 7:** Een proton bestaat uit de combinatie  $[u u d]$ .

- (a) Noteer de quarksamenstelling van het antideeltje van een proton.

**Antwoord:**  $\bar{u}, \bar{u}$  en  $\bar{d}$  of  $\bar{p} = [\bar{u} \bar{u} \bar{d}]$

(b) Bereken de lading van het antiproton.

**Antwoord:**  $-\frac{2}{3} - \frac{2}{3} + \frac{1}{3} = -1$ .

**Opdracht 8:** Een neutron bestaat uit de combinatie  $[u d d]$ .

(a) Bereken de lading van een antineutron.

**Antwoord:** Een anti neutron bestaat dus uit  $[\bar{u} \bar{d} \bar{d}]$ . Hieruit volgt:  $-\frac{2}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0$ .

De gegeven quark-combinatie is niet stabiel.

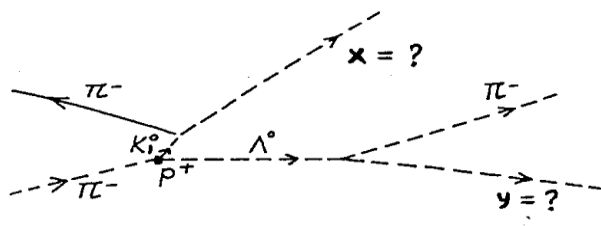
(b) Welke drie deeltjes ontstaan bij het verval van een neutron?

**Antwoord:**  $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ . Een neutron vervalt in een proton, een elektron en een anti-elektronneutrino.

## 2 Reacties

**Opdracht 9:** Op de schets van een bellenvatfoto is te zien, dat bij de botsing van een aanstormend pion op een proton, een kaon en een lambda ontstaan. Zie Figuur 2.1. Zowel het kaon als het lambda zijn instabiel. Zoek met BINAS uit wat de identiteit is van deeltje x en van deeltje y.

**Antwoord:** Deeltje  $x = \pi^+$  en deeltje  $y = p$ . Want  $K^0$  vervalt door een  $\pi^+$  en een  $\pi^-$  uit te zenden.  $\Lambda$  vervalt door een  $\pi^-$  en een  $p$  uit te zenden (te verklaren door behoud van Baryon getal en behoud van lading).



**Figuur 2.1** – Bellenvat schets van een foto van de reacties van een pion.

**Opdracht 10:** In BINAS-26 wordt als eenheid van massa vermeld:  $\text{MeV c}^{-2}$ .

(a) Wat wordt hiermee bedoeld?

**Antwoord:**

$$E = m \cdot c^2 \rightarrow m = \frac{E}{c^2}$$
$$[m] = [\text{MeV c}^{-2}]$$

(b) Hoeveel keer zo traag is het muon vergeleken met het electron? Leg uit.

**Antwoord:** Massa staat voor de traagheid van een deeltje. Dus:

$$m(\mu) = 105,6 \text{ MeV/c}^2$$
$$m(e) = 0,51 \text{ MeV/c}^2$$
$$\text{aantal keer trager: } \frac{105,6}{0,51} = 2,1 \times 10^2$$

(c) Hoeveel energie is er minstens nodig om een muon en zijn antideeltje te creëren? Leg uit.

**Antwoord:**  $2 \times 105,6 \text{ MeV/c}^2 = 211 \text{ MeV/c}^2$

**Opdracht 11:** Het  $\pi^+$ -meson bestaat uit de quarks u en  $\bar{d}$ .

(a) Bereken het massadefect bij het combineren van een u met een  $\bar{d}$  quark. *Binas geeft een indicatie van de quarkmassa! Quarks bestaan niet los!*

**Antwoord:**

$$\Delta m = m(\pi) - m(u + \bar{d}) = 139,6 \text{ MeV/c}^2 - (2,0 \text{ MeV/c}^2 + 4,8 \text{ MeV/c}^2)$$
$$= 132,8 \text{ MeV/c}^2$$

(b) Bereken de bindingsenergie van de quarks in het  $\pi^+$ -meson.

**Antwoord:** Massadefect is dan gelijk aan de bindingsenergie. Er is een enorme bindingsenergie als quarks combineren tot elementaire deeltjes, vandaar dat we quarks nooit los aantreffen, maar altijd als combinaties in deeltjes.

**Opdracht 12:** Gegeven: een reactie waarbij uit één baryon een nieuw baryon én een meson ontstaat:  $\Delta^{++} \longrightarrow p + \pi^+$

(a) Uit welke quarks bestaan het  $p^+$  en  $\pi^+$ ?

**Antwoord:**  $p^+ = [udd]$  en  $\pi^+ = [u\bar{d}]$

(b) Uit welke quarkcombinatie bestaat het  $\Delta^{++}$ -deeltje?

**Antwoord:** Het  $\Delta^{++}$  bestaat uit  $[uuu]$

De massa van het  $\Delta^{++}$ -deeltje is  $1230 \text{ MeV } c^{-2}$ .

(c) Bereken de massa van het  $\Delta^{++}$ -deeltje, uitgedrukt in kilogram.

**Antwoord:**

$$938,49 \text{ MeV}/c^2 = 1u = 1,667 \times 10^{-27} \text{ kg};$$
$$m(\Delta^{++}) = (1230/938,49) * 1,667 \times 10^{-27} \text{ kg} = 2,201 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

(d) Hoeveel energie komt vrij bij het verval van het  $\Delta^{++}$ -deeltje? Geef de berekening.

**Antwoord:**

$$\Delta^{++} \rightarrow p^+ + \pi^+$$
$$m(\Delta^{++}) = 1230 \text{ MeV}/c^2$$
$$m(p^+) = 938 \text{ MeV}/c^2;$$
$$m(\pi^+) = 139,6 \text{ MeV}/c^2$$
$$\Delta m = 152,4 \text{ MeV}/c^2$$

### 3 De zon en neutrino's

**Opdracht 13:** De energieproductie van een ster is voor een deel afkomstig van kernfusie (het overige deel is het gevolg van gravitatiecontractie). Voor fusie is in een ster een overvloed aan waterstofkernen aanwezig. Via een reeks van vier opeenvolgende stappen wordt waterstof omgezet in helium. Bij de eerste stap ontstaan onder andere een deuteriumkern en een neutrino:



De laatste stap betreft het “opruimen” van de positronen door middel van annihilatie.

- (a) Wat is in de opeenvolgende stappen de identiteit van de met “?” aangegeven deeltjes?

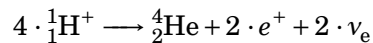
**Antwoord:** Stap 2:  ${}^1_1\text{H}^+$ . Stap 3:  ${}^1_1\text{H}^+$ . Stap 4:  $e^-$ .

- (b) Hoeveel waterstofkernen zijn (netto) nodig geweest om één heliumkern te vormen?

**Antwoord:** Er zijn 4 waterstofkernen nodig.

- (c) Geef de netto-vergelijking voor de productie van één heliumkern.

**Antwoord:** Je moet stap 1 en stap 2 vermenigvuldigen met 2, om in stap 3 de benodigde twee He-3 kernen te krijgen.



- (d) Bereken de energie die bij de productie van één heliumatoom vrijkomt.

**Antwoord:** We gebruiken de netto vergelijking bij vraag c. De positronen annihileren en produceren gamma's.

$$m(4 \cdot {}^1_1\text{H}^+) = 4 \cdot 1,008 \text{ u} = 4,032 \text{ u}$$

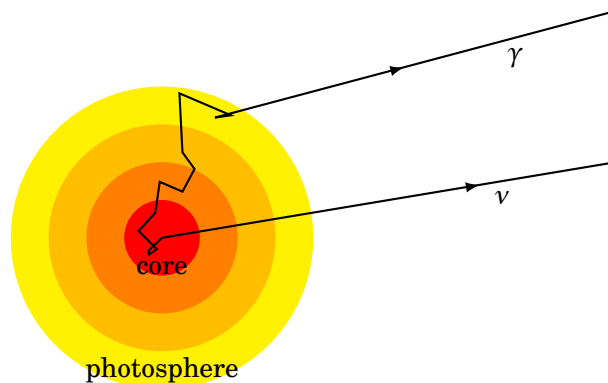
$$m({}^4_2\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$$

$$\Delta m = 0,029 \text{ u}$$

$$E = 0,029 \text{ u} \cdot 931,49 = 27,3 \text{ MeV}$$

**Opdracht 14:** De energieproductie van onze zon vindt voornamelijk plaats in de kern doordat waterstofkernen fuseren tot helium. Bij één fusieproces wordt 26,731 MeV energie geproduceerd en komen twee neutrino's vrij. In Figuur 3.1 zie je een gamma en een neutrino de zon verlaten. Beide zijn ongeveer geproduceerd op hetzelfde moment.

- (a) Leg uit dat het neutrino de zon veel sneller zal verlaten dan het gamma.



**Figuur 3.1** – Zonsdoorsnede

**Antwoord:** Het neutrino heeft (bijna) geen interactie met materie dus zal met ongeveer de lichtsnelheid door de zon gaan. Het gammafoton wordt keer op keer geabsorbeerd en weer uitgezonden door atomen in de zon. Voordat het foton het zonsoppervlak heeft bereikt, kunnen er wel een miljoen jaar verstreken zijn.

- (b) Zoek op in BINAS hoe groot het uitgestraald vermogen van de zon is.

**Antwoord:** Het uitgestraalde vermogen is  $P = 0,390 \times 10^{27} \text{ W}$ .

- (c) Bereken het aantal neutrino's dat de zon per seconde uitzendt.

**Antwoord:** We weten het vermogen van de zon en wat er per reactie aan energie vrijkomt. Per ('netto'-) reactie komen er twee neutrino's vrij.

$$E_{\text{reactie}} = 26,731 \text{ MeV} \times 1,602 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}$$

$$E_{\text{reactie}} = 4,2823 \times 10^{-12} \text{ J}$$

$$n = \frac{P}{E} = \frac{0,390 \times 10^{27} \text{ W}}{4,2823 \times 10^{-12} \text{ J}}$$

$$n = 2 \times 9,11 \times 10^{37} = 1,82 \times 10^{38}$$

- (d) Bereken de massavermindering van de zon in één jaar.

**Antwoord:** Het aantal reacties per s is  $9,11 \times 10^{37}$ . In één jaar zitten  $3,15 \times 10^7 \text{ s}$ . Per reactie wordt  $\frac{26,731 \text{ MeV}}{938,49 \text{ MeV/u}} = 0,0285 \text{ u}$  omgezet. Dit is  $4,748 \times 10^{-29} \text{ kg}$  per reactie. Dus aantal reacties per jaar:

$$n_{\text{reacties}} = 3,15 \times 10^7 \text{ s} \times 9,11 \times 10^{37} / \text{s}$$

$$n_{\text{reacties}} = 2,87 \times 10^{45}$$

$$m_{\text{omgezet in één jaar}} = 2,87 \times 10^{45} \times 4,748 \times 10^{-29} \text{ kg} = 1,36 \times 10^{17} \text{ kg}$$

Alle neutrino's verlaten de zon. Ze worden naar alle richtingen uitgezonden. Op aarde is een neutrinodector opgesteld met een naar de zon gekeerde doorsnede van  $5,0 \text{ m}^2$ .

(e) Zoek op in BINAS hoe groot de afstand van de detector tot de zon gemiddeld is.

**Antwoord:** De afstand van de aarde tot de zon is (gem.)  $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$

(f) Bereken hoeveel neutrino's per seconde de detector bereiken.

**Antwoord:** De geproduceerde neutrino's worden verdeeld over een boloppervlak met een straal van  $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$ . Voor het oppervlak van een bol geldt:  $A = 4\pi r^2$ .

$$\begin{aligned} A_{\text{bol}} &= 4 \cdot \pi \cdot (1,496 \times 10^{11})^2 \\ A_{\text{bol}} &= 2,812 \times 10^{23} \text{ m}^2 \\ n_{\text{neutrino's door detector}} &= \frac{5,0}{2,812 \times 10^{23}} * 1,82 \times 10^{38} \\ n_{\text{neutrino's door detector}} &= 3,2 \times 10^{15} \end{aligned}$$