



## 1 Kosmische deeltjes

**Opdracht 1:** Er is een naam voor het fysisch verschijnsel dat *poollicht* of *noorderlicht* veroorzaakt. Zoek (in de literatuur of op internet) deze naam op.

**Antwoord:** Fluorescentie

## 2 De energie van een deeltje

**Opdracht 2:** Als een muon een snelheid heeft dat 99,9% is van de lichtsnelheid, dan is zijn energie 2,36 GeV. Druk de energie van 2,36 GeV uit in joule (J).

**Antwoord:**

$$2,36 \text{ GeV} \times 1,60 \times 10^{-10} \text{ J/GeV} = 3,78 \times 10^{-10} \text{ J}$$

**Opdracht 3:** Een proton heeft in rust een energie van 938 MeV. Bereken de energie van een kosmisch proton dat beweegt met een snelheid dat 99,99% is van de lichtsnelheid.

**Antwoord:**

$$E(0,9999c) = \frac{938}{\sqrt{1 - 0,9999^2}} \text{ MeV} = 66,3 \text{ GeV}.$$

**Opdracht 4:** In 2007 kwam voor het eerst een harde schijf op de markt met een geheugen van 1 terabyte (TB). Het geheugen van hard disks (harde schijven) groeit ruwweg met een factor 1,6 per jaar. Stel dat deze groei doorzet (wat niet de verwachting is), in welk jaar zal dan een hard disk met een geheugen van 1 exabyte (EB) op de markt komen?

**Antwoord:**

$$1,6^t = \frac{10^{18}}{10^{12}} \Rightarrow t = 29,4 \Rightarrow \text{in 2036}.$$

## 3 Showers

### 3.1 Electromagnetische showers

**Opdracht 5:** Het omgekeerde proces van paar-creatie komt ook voor in de natuur: paar-annihilatie. Zoek (in de literatuur of op internet) op wat dat is en geef de bijbehorende reactievergelijking.

**Antwoord:**  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ , maar bijvoorbeeld  $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$  en  $e^- + e^+ \rightarrow q + \bar{q}$  ( $q$  = quark en  $\bar{q}$  = antiquark) zijn ook mogelijk.

### 3.2 Eenvoudig model voor de elektromagnetische shower

**Opdracht 6:** Ga uit van het Heitler model. Als een kosmisch gamma-deeltje van 1 EeV de dampkring binnenkomt, na hoeveel stappen stopt, volgens het Heitler model, dan de shower?

**Antwoord:**

$$\frac{10^{18}}{2^n} = 84 \cdot 10^6 \Rightarrow n = 33,5 \Rightarrow \text{na 34 stappen.}$$

### 3.3 Hadronische showers

**Opdracht 7:** Elektronen en muonen zijn elementaire geladen deeltjes die behoren tot de zogenaamde *leptonen*. Er is nog een soort geladen elementair deeltje dat tot de leptonen behoort. Zoek (in de literatuur of op internet) op hoe dat deeltje wordt genoemd.

**Antwoord:** Het tau-deeltje ( $\tau$ )

**Opdracht 8:** Het proton is geen elementair deeltje omdat het is samengesteld uit 3 quarks (quarks zijn wel elementaire deeltjes). Zoek (in de literatuur of op internet) op uit hoeveel quarks een geladen pion bestaat.

**Antwoord:** Twee (een quark en een antiquark)

## 4 Levensduur en relativiteit

**Opdracht 9:** In een shower ontstaat een geladen pion met een energie van 1 TeV. Zoek de rustmassa van een geladen pion op (bijv. in BINAS) en bereken de verwachte levensduur van dit pion.

**Antwoord:** De rustmassa van een geladen pion is  $140 \text{ MeV}/c^2$  (opzoeken, bijv. in BINAS), dus de energie van een geladen pion in rust is 140 MeV

$$\tau(v) = \tau_0 \cdot \frac{E(v)}{E_0} = 2,6 \times 10^{-8} \cdot \frac{10^{12}}{140 \times 10^6} \Rightarrow \tau(v) = 186 \mu\text{s}$$

**Opdracht 10:** In een shower ontstaat een geladen pion met een energie van 100 GeV. Ga er vanuit dat door toeval het pion geen sterke wisselwerking meer ondergaat. In plaats daarvan vervalt het na een tijdje. Bereken de verwachte afstand die dit pion dan zal hebben afgelegd.

**Antwoord:**

$$\begin{aligned}\tau(v) &= \tau_0 \cdot \frac{E(v)}{E_0} = 2,6 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10^{11}}{140 \times 10^6} \Rightarrow \tau(v) = 18,6 \mu\text{s} \\ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} &= \frac{E_0}{E(v)} = \frac{140 \times 10^6}{10^{11}} = 1,40 \times 10^{-5} \Rightarrow v \approx c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \\ x &= v \cdot \tau(v) = 3 \times 10^8 \cdot 1,86 \times 10^{-5} = 5,6 \times 10^3 \text{ m} (= 5,6 \text{ km}).\end{aligned}$$