

# 16 Elementaire deeltjes vwo

## 16.0 Overzicht

### 16.1 Quarks en leptonen

- Hoe groot is de kern van een atoom ongeveer?
- Waarom zijn protonen en neutronen geen elementaire deeltjes?
- Uit welke deeltjes bestaan een proton en uit welke deeltjes een neutron?
- Hoeveel verschillende quarks zijn er en hoe heten ze?
- Wat is een lepton en hoeveel verschillende leptonen zijn er?
- Wat is het verschil tussen de quarks en leptonen in de drie families?
- Hoeveel eigenschappen heeft een elementair deeltje?
- Welke eenheid gebruik je voor de massa van een elementair deeltje?
- Hoe groot zijn de elektrische ladingen van de quarks?
- Hebben alle elementaire deeltjes een elektrische lading?
- Hoe groot is de zwakke isospin van een quark en van een lepton?
- Hoeveel oriëntaties kan de zwakke isospin hebben?
- Hebben alle elementaire deeltjes kleur?
- Hoeveel verschillende kleuren zijn er en welke namen hebben ze?
- Waarin verschilt het antideeltje van het bijbehorende deeltje?

### 16.2 Samengestelde deeltjes

- Wat is een hadron, wat is een baryon en wat is een meson?
- Wat is een pentaquark?
- Kan een deeltje bestaan uit quarks uit verschillende families?
- Hoe zijn de  $\Delta$ -baryonen (delta baryonen) samengesteld?
- Hoe zijn de  $\Sigma$ -baryonen (sigma baryonen) samengesteld?
- Hoe zijn de  $\Lambda$ -baryonen (labda baryonen) samengesteld?
- Hoe zijn de  $\Xi$ -baryonen (xi-baryonen) samengesteld?
- Hoe zijn de  $\pi$ -mesonen (pionen) samengesteld?
- Hoe zijn de K-mesonen (kaonen) samengesteld?
- Hoe zijn de D-mesonen samengesteld?
- Hoe zijn de B-mesonen samengesteld?

### 16.3 Krachtdeeltjes

- Hoe wordt er tegenwoordig gedacht over de werking van kracht over afstand?
- Hoeveel verschillende krachten zijn er?
- Hoe heten de krachtdeeltjes die bij deze krachten horen?
- Op welke deeltjes werkt de sterke kernkracht?
- Hoe verandert de sterke kernkracht als de afstand toeneemt?
- Waarom werkt de sterke kernkracht niet op leptonen?
- Oefenen gluonen sterke kernkracht op elkaar uit?

- Hoe verandert de elektromagnetische kracht als de afstand toeneemt?
- Oefenen fotonen elektromagnetische kracht op elkaar uit?
- Wanneer speelt de zwakke kernkracht een grote rol?
- Oefenen de  $W$ -deeltjes en het  $Z^0$ -deeltje zwakke kernkracht op elkaar uit?
- Waarom is de zwaartekracht onbelangrijk bij elementaire deeltjes?
- Hoe verhouden zich de sterkte van de krachten ongeveer?
- Op welke manier wisselwerken gluonen met quarks?
- Wat bepaalt de massa van een proton?
- Waarom zijn quarks altijd opgesloten in een hadron?
- Wat is de rol van het higgsdeeltje?
- Wat is het standaardmodel?
- Wat is renormaliseren en waarom is dit belangrijk?

#### 16.4 Feynmandiagrammen

- Hoe verloopt de tijd in een feynmandiagram?
- Hoe heet de plaats waar twee deeltjes samenkomen?
- Waarom is er altijd één krachtdeeltje betrokken bij een gebeurtenis?
- Wat geeft de richting van een pijl aan in een feynmandiagram?
- In welke richting wijst de pijl bij een antideeltje?
- Wat is "kruisen"?
- Waarom zijn alle reacties met elementaire deeltjes omkeerbaar?
- Hoe verloopt het  $\beta^-$ -verval?
- Bij welk proces is een higgsdeeltje betrokken?

#### 16.5 Behoudswetten

- Wat is een behoudswet?
- Waar wordt een behoudswet door veroorzaakt?
- Waarom is er behoud van massa-energie?
- Wat is impuls en wat is de eenheid van impuls?
- Waarom is er behoud van impuls?
- Wat is impulsmoment en wat is de eenheid van impulsmoment?
- Waarom is er behoud van impulsmoment?
- Waarom is er behoud van elektrische lading?
- Wat is het quarkgetal en wat is behoud van quarkgetal?
- Wat is het baryongetal en wat is behoud van baryongetal?
- Wat is het leptongetal en wat is behoud van leptongetal?
- Wanneer geldt het behoud van leptongetal niet.

#### 16.6 Behoud van impuls en van energie

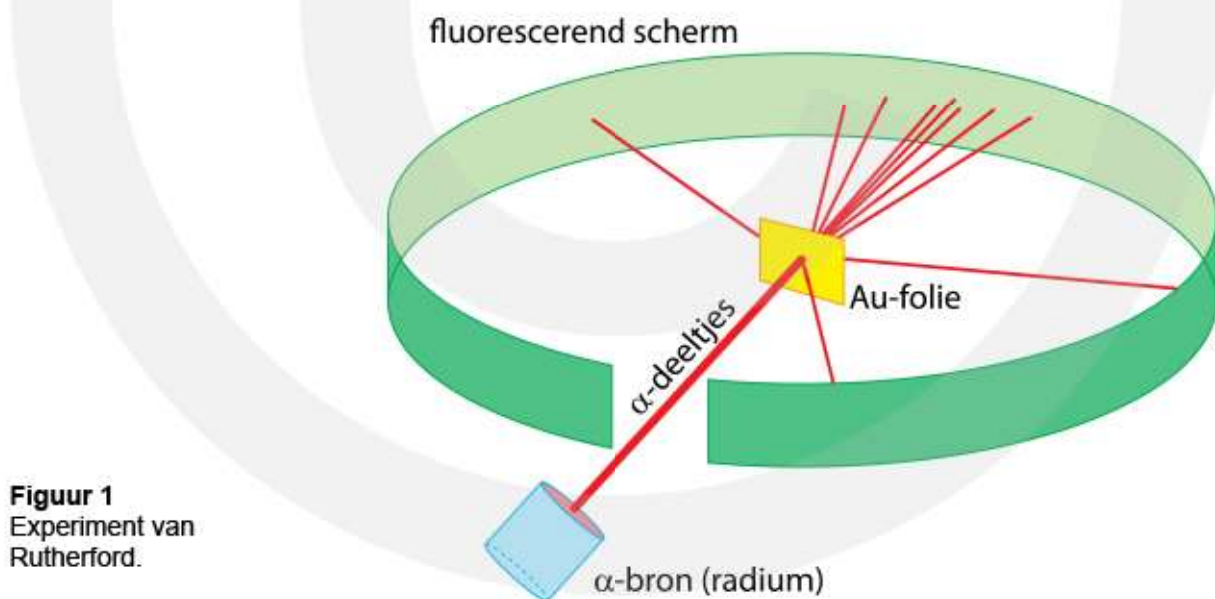
- Wat is de stoot?
- Waarom is de stoot gelijk aan de verandering van impuls?
- Wanneer is een botsing elastisch en wanneer inelastisch?
- Met welke formule bereken je de impuls van een foton?
- Welke relatie geldt tussen impuls en kinetische energie bij lage snelheid?
- Welke relatie geldt tussen impuls en de energie bij hoge snelheid?
- Hoe bereken je de kinetische energie bij een deeltje met hoge snelheid?
- Wat weet je van de snelheid van een deeltje zonder rustmassa?

# 16.1 Quarks en leptonen

## De bouw van een atoom

De naam "atoom" is door Democritus (Griekenland, 460 – 356 v. Chr.) bedacht en komt van het Griekse woord "a-tomos" wat "on-deelbaar" betekent. Maar zoals we nu weten is een atoom helemaal niet ondeelbaar. Een atoom heeft een kern met daaromheen elektronen. De kern bevat veruit de meeste massa en bestaat uit protonen en neutronen.

Deze structuur van het atoom is door Ernest Rutherford (Nieuw Zeeland, 1871–1937) in 1911 ontdekt. In zijn beroemde experiment schiet hij een bundel  $\alpha$ -deeltjes (He-4 kernen) op een dunne goudfolie. Zie figuur 1. De meeste  $\alpha$ -deeltjes gaan dwars door het folie heen, maar soms buigt een  $\alpha$ -deeltje af of kaatst het terug. Als de massa van het goud gelijkmatig is verdeeld over de folie, verwacht je dat ieder  $\alpha$ -deeltje dwars door de folie schiet. Uit het feit dat sommige  $\alpha$ -deeltjes afbuigen of terugkaatsen volgt dat de massa in het goudfolie niet gelijkmatig is verdeeld. Er zijn plaatsen met veel massa (de atoomkernen) en plaatsen met vrijwel geen massa (de ruimte tussen de atoomkernen). Uit de manier waarop  $\alpha$ -deeltjes door het goudfolie worden verstrooid heeft Rutherford de grootte en de massa van de atoomkernen berekend.



**Figuur 1**  
Experiment van Rutherford.

Als gevolg op deze ontdekking ontwikkeld Niels Bohr (Denemarken, 1885–1962) in 1913 een atoommodel, wat rond 1924 resulteert in de kwantummechanica. Om de kwantummechanica in overeenstemming te brengen met de relativiteitstheorie ontwikkelt Paul Dirac (Engeland, 1902–1984) een theorie waaruit volgt dat er naast negatief geladen elektronen ook positief geladen elektronen moeten bestaan. Zo'n positief geladen elektron wordt een **positron** genoemd en is het **antideeltje** van het elektron. Als een positron op een elektron botst houden ze beide op te bestaan en worden er twee fotonen gecreëerd. De gezamenlijke energie van deze fotonen is gelijk aan de totale energie (inclusief  $E = m_0 c^2$ ) van het elektron-positron paar.

Bij de bestudering van **kosmische straling** neemt Carl Anderson (Verenigde Staten, 1905–1991) in 1932 het positron voor het eerst waar. Deze ontdekking opent de jacht op exotische deeltjes. Kosmische straling blijkt deeltjes te bevatten die we op aarde niet kennen. In 1936 ontdekt Anderson deeltjes die we **muonen** noemen. Muonen lijken op elektronen, maar hebben een veel grotere massa. Er worden nog veel meer deeltjes gevonden die niet bestaat uit protonen, neutronen of elektronen. Deze deeltjes vertonen **vreemd** gedrag. De hoeveelheid "vreemdheid" blijkt te variëren, sommige vreemde deeltjes zijn vreemder dan andere.

In dezelfde periode ontwikkelt Ernest Lawrence (Verenigde Staten, 1901–1958) een nieuw type deeltjesversneller, het **cyclotron**, waarmee elektrisch geladen deeltjes worden versneld. Het eerste cyclotron uit 1932 haalt een energie van 5 MeV en in 1946 wordt een energie van ongeveer 750 MeV bereikt. Voor huidige standaarden is dit bescheiden, maar het is genoeg om nieuwe deeltjes te creëren. Elektrisch geladen deeltjes, zoals elektronen en protonen, worden met grote snelheid op een metaalplaatje of op elkaar geschoten, waarna de brokstukken worden onderzocht. Dit onderzoek levert een grote hoeveelheid nieuwe deeltjes op.

## Quarks en leptonen

Om het bestaan van deeltjes met "vreemd" gedrag te verklaren ontstaat in 1961 het idee dat protonen en neutronen zijn samengesteld uit nog kleinere deeltjes, **quarks** genaamd. Met deze aanname lukt het om structuur aan te brengen in de veelheid van waargenomen deeltjes. In eerste instantie wordt aan het reëel bestaan van quarks getwijfeld. Maar dat verandert als er experimenten worden uitgevoerd waarbij elektronen met grote snelheid op protonen worden geschoten. Omdat een proton een diameter heeft van ongeveer  $10^{-15}$  m, en daarmee 100.000 keer kleiner is dan de diameter van een atoom ( $\sim 10^{-10}$  m), is de kans dat een elektron op een proton botst erg klein. Maar als dit gebeurt worden sommige elektronen afgebogen of teruggekaatst. Net als bij het experiment van Rutherford kan hieruit worden geconcludeerd dat een proton niet massief is maar drie quarks bevat. Quarks bestaan dus echt! Een proton bevat twee **up**-quarks en één **down**-quark. De namen **up** en **down** hebben geen betekenis. Ook een neutron bevat drie quarks, namelijk één up-quark en twee down-quarks.

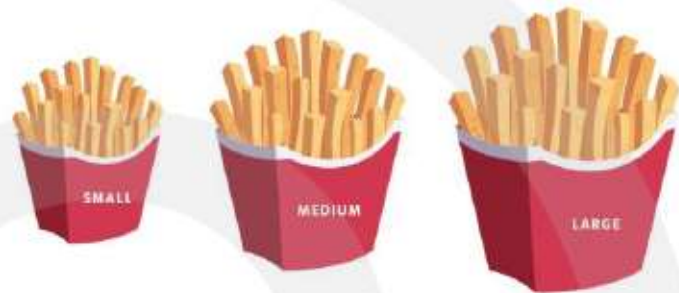
Protonen en neutronen bevatten uitsluitend up-quarks en down-quarks. Deeltjes die vreemd gedrag vertonen bevatten een quark met de toepasselijke naam **strange**. In 1974 worden er deeltjes ontdekt die weer een andere quark bevatten, het **charm** quark. In 1977 wordt het **bottom**-quark ontdekt en tenslotte in 1995 het **top**-quark. In totaal zijn er zes verschillende quarks met de namen: **up – down – charm – strange – top – bottom**. Om schrijfwerk te verminderen worden de quarks met letters aangegeven:

**u** (up)      **d** (down)      **c** (charm)      **s** (strange)      **t** (top)      **b** (bottom)

Deeltjes met charm-, strange-, top-, en bottom-quarks leven maar kort, minder dan een miljardste seconde. Vlak nadat ze in een deeltjesversneller zijn gemaakt vallen ze spontaan uit elkaar in lichtere deeltjes en in energie. Alleen protonen en elektronen zijn stabiel, alle andere deeltjes (ook neutronen) vallen spontaan uit elkaar.

Het **elektron** bestaat niet uit quarks maar is van zichzelf een elementair deeltje. De elementaire deeltjes waartoe het elektron behoort heten de **leptonen**. Ook een **neutrino** (een soort ongeladen elektron) is een lepton. Naast de zes verschillende quarks zijn er ook zes verschillende leptonen.

De zes quarks en de zes leptonen zijn verdeeld over drie **families** van elementaire deeltjes, ook wel **generaties** genoemd. Het enige verschil tussen de drie families is de massa van de deeltjes. Familie 1 bevat deeltjes met een kleine massa, familie 2 deeltjes met een gemiddelde massa, en familie 3 deeltjes met een grote massa. Zie figuur 2.



**Figuur 2**  
Small – medium – large.

Het **up**-quark en het **down**-quark hebben een kleine massa en horen bij familie 1. Het **charm**-quark en het **strange**-quark hebben een gemiddelde massa en horen bij familie 2. Het **top**-quark en het **bottom**-quark hebben een grote massa en horen bij familie 3. Verder bevat iedere familie ook twee leptonen. Zie figuur 3. Waarom er drie families zijn is niet bekend. Een vierde familie met nog zwaardere deeltjes is ondanks veel onderzoek nog nooit gevonden.

<b>Familie I</b> kleine massa	u u u up	$\nu_e$ e-neutrino
	d d d down	e elektron
<b>Familie II</b> gemiddelde massa	c c c charm	$\nu_\mu$ $\mu$ -neutrino
	s s s strange	$\mu$ muon
<b>Familie III</b> grote massa	t t t top	$\nu_\tau$ $\tau$ -neutrino
	b b b bottom	$\tau$ tauon

**Figuur 3**  
Drie families quarks en leptonen.

Iedere familie bevat twee quarks en twee leptonen. De quarks en de leptonen binnen een familie zijn "**koppeltjes**". De twee quarks van een familie zijn nauw met elkaar verbonden en kunnen in elkaar worden omgezet. Hetzelfde geldt voor de twee leptonen van een familie. Het is een beetje te vergelijken met de voorkant en de achterkant van een muntstuk. Draai je een up-quark om dan krijg je een down-quark.

Van elke quark zijn er drie versies, aangegeven met wat we de **kleur** noemen, rood, groen of blauw. Later leer je hier meer over. Van elke quark bestaat er een antiquark, zodat er in totaal 36 verschillende quarks zijn. Daarnaast zijn er 6 leptonen en 6 anti-leptonen. Samen met de 36 verschillende quarks brengt dit het aantal elementaire deeltjes op 48. Maar hiermee zijn we er nog niet, want zoals je later in dit hoofdstuk leert worden de krachten die deze deeltjes op elkaar uitoefenen overgedragen via andere elementaire deeltjes, de krachtdeeltjes. En als sluitsteen is er het higgsdeeltje, waarmee we uitkomen op in totaal 61 elementaire deeltjes.

## Eigenschappen van elementaire deeltjes

Elementaire deeltjes hebben vier eigenschappen waarmee ze zich van elkaar onderscheiden. Ze hebben **massa**, **elektrische lading**, **zwakke isospin** en **kleur**. Deze vier eigenschappen bepalen hoe de deeltjes op elkaar reageren.

### – massa –

De basiseenheid voor massa is de kilogram. Voor atomen gebruik je liever de atomaire massa eenheid  $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$  kg. Voor elementaire deeltjes wordt vaak weer een andere eenheid voor massa gebruikt:  $\text{MeV}/c^2$  of  $\text{GeV}/c^2$ . Deze eenheid is gebaseerd op de relatie tussen energie en massa:  $E = m \cdot c^2$ . Een massa van  $1 \text{ GeV}/c^2$  is ongeveer gelijk aan  $1 u$  en dus gelijk aan de massa van één proton of neutron.

$$1 \text{ MeV} / c^2 = 1,07354 \cdot 10^{-3} u = 1,78266 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

$$1 \text{ GeV} / c^2 = 1,07354 u = 1,78266 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

### BEWIJS

- $E = m \cdot c^2 \rightarrow m = \frac{E}{c^2}$
- $1 \text{ MeV} = 1,60218 \cdot 10^{-13} \text{ J} \rightarrow \frac{1 \text{ MeV}}{c^2} = \frac{1,60218 \cdot 10^{-13}}{(2,99792 \cdot 10^8)^2} = 1,78266 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$

### – elektrische lading –

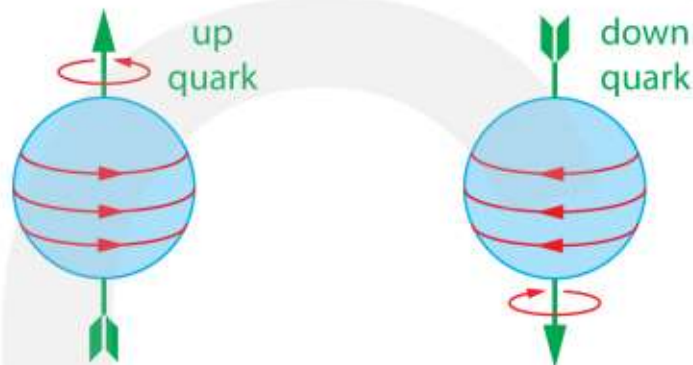
Iedere quark heeft elektrische lading  $Q$ . De lading van een quark is kleiner dan de elementaire ladingsquantum. Van de leptonen hebben alleen het elektron, het muon en het tauon een elektrische lading van  $-1$ . De neutrino's hebben geen elektrische lading. In het onderstaande overzicht is de lading  $Q$  uitgedrukt in de elementaire ladingsquantum  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

up	charm	top	→	$Q = +2/3$
down	strange	bottom	→	$Q = -1/3$
e-neutrino	$\mu$ -neutrino	$\tau$ -neutrino	→	$Q = 0$
elektron	muon	tauon	→	$Q = -1$

## – zwakke isospin –

In het hoofdstuk kernfysica heb je kennisgemaakt met het spontaan vervallen van atoomkernen. De eigenschap **zwakke isospin**, symbool  $I$ , speelt hierbij een cruciale rol. Buiten een atoomkern speelt zwakke isospin geen rol van betekenis. Vandaar dat in andere delen van de natuurkunde en in de scheikunde zwakke isospin geen aandacht krijgt.

Quarks en leptonen hebben zwakke isospin. Het lijkt alsof quarks en leptonen om hun eigen as tollen (Engels: spinnen). De werkelijkheid is veel complexer maar voor ons begrip is dat niet belangrijk. Iedere quark en ieder lepton heeft dezelfde hoeveelheid zwakke isospin, namelijk  $\frac{1}{2}$  keer een bepaalde eenheid. De zwakke isospin kan twee richtingen hebben, omhoog of omlaag. Zie figuur 4.



**Figuur 4**  
Zwakke isospin.

De elektrische lading  $Q$  en de zwakke isospin zijn aan elkaar gerelateerd. Er geldt:  $Q = I_3 + \frac{1}{2} Y$ , waarbij  $Y$  de **zwakke hyperlading** is. Hieruit blijkt dat er op het niveau van de elementaire deeltjes verbanden zijn die op grotere schaal geen rol spelen.

Bij de quarks up, down en top is de isospin naar boven gericht, wat we aangeven  $I_3 = +\frac{1}{2}$ . Bij de quarks down, strange en bottom is de isospin naar beneden gericht:  $I_3 = -\frac{1}{2}$ . De neutrino's hebben  $I_3 = +\frac{1}{2}$ . Het elektron, het muon en het tauon hebben isospin  $I_3 = -\frac{1}{2}$ .

<b>up</b>	<b>charm</b>	<b>top</b>	→	$I_3 = +1/2$
<b>down</b>	<b>strange</b>	<b>bottom</b>	→	$I_3 = -1/2$
<b>e-neutrino</b>	<b>μ-neutrino</b>	<b>τ-neutrino</b>	→	$I_3 = +1/2$
<b>elektron</b>	<b>muon</b>	<b>tauon</b>	→	$I_3 = -1/2$

## – kleur –

Iedere quark heeft behalve massa, elektrische lading en zwakke isospin ook **kleur**. Net als de zwakke isospin speelt kleur alleen een rol binnen in een atoomkern. Er zijn drie kleuren **rood**, **groen** en **blauw**. Uiteraard hebben deze namen niets te maken met de kleuren zoals wij ze zien. Het zijn handige namen, zoals je verderop zult leren. De kleur van een quark geef je aan met subscript  $r$ ,  $g$ , en  $b$ .

Ieder deeltje dat uit quarks bestaat is kleumentraal (wit). Een deeltje samengesteld uit drie quarks bevat één quark met een rode kleur, één quark met een groene kleur en één quark met een blauwe kleur. Rood, groen en blauw licht geeft wit licht. Een vergelijkbaar idee geldt voor de quark-kleur. Een rode- plus een groene- plus een blauwe kleur geeft een neutrale (witte) kleur. Deze overeenkomst met zichtbaar licht is de reden dat er bij quarks over kleur wordt gesproken. Leptonen hebben geen kleur. Aan interacties waarbij kleur een rol speelt doen de leptonen niet mee.

In onderstaand schema zie je de deeltjes van het standaardmodel met hun eigenschappen.

**Tabel 1** Massa, elektrische lading en zwakke isospin en kleur van de elementaire deeltjes.

	deeltje	massa (MeV/c <sup>2</sup> )	elektrische lading Q	zwakke isospin I <sub>3</sub>	kleur
<b>Familie I</b>	up-quark	2,4	+2/3	+1/2	r g b
	down-quark	4,8	-1/3	-1/2	r g b
	e-neutrino	< 1* eV/c <sup>2</sup>	0	+1/2	–
	elektron	0,511	-1	-1/2	–
<b>Familie II</b>	charm-quark	1,275·10 <sup>3</sup>	+2/3	+1/2	r g b
	strange-quark	95	-1/3	-1/2	r g b
	μ-neutrino	< 1* eV/c <sup>2</sup>	0	+1/2	–
	muon	105,67	-1	-1/2	–
<b>Familie III</b>	top-quark	172,44·10 <sup>3</sup>	+2/3	+1/2	r g b
	bottom-quark	4,18·10 <sup>3</sup>	-1/3	-1/2	r g b
	τ-neutrino	< 1* eV/c <sup>2</sup>	0	+1/2	–
	tau	1,7768·10 <sup>3</sup>	-1	-1/2	–

\* De massa's van de neutrino's zijn nog niet bekend.

## Antideeltjes

Ieder elementair deeltje heeft een antideeltje met tegengestelde elektrische lading, tegengestelde zwakke isospin en tegengestelde kleur (alleen voor quarks). De massa van een antideeltje is NIET tegengesteld. Negatieve massa bestaat niet.

Een **antiquark** wordt aangegeven met een streepje boven de letter:  $\bar{u}$  anti-up,  $\bar{d}$  anti-down,  $\bar{c}$  anti-charm,  $\bar{s}$  anti-strange, etc. Om een tegengestelde kleur aan te geven gebruiken we ook een streepje boven de letter:  $\bar{r}$  anti-rood,  $\bar{g}$  anti-groen,  $\bar{b}$  anti-blauw. In onderstaand schema zie je alle mogelijke varianten van up-quarks, anti-up-quarks, down-quarks en anti-down-quarks.

rood  $u_r$  en  $\bar{u}_r$  |  $d_r$  en  $\bar{d}_r$

groen  $u_g$  en  $\bar{u}_g$  |  $d_g$  en  $\bar{d}_g$

blauw  $u_b$  en  $\bar{u}_b$  |  $d_b$  en  $\bar{d}_b$

Een **anti-lepton** geven we ook aan met een streepje boven de letter:  $\bar{e}$  anti-elektron,  $\bar{\nu}_e$  anti-elektron neutrino, etc. We schrijven ook wel  $e^-$  voor het elektron en  $e^+$  voor het anti-elektron (positron). Een lepton heeft geen kleur en een anti-lepton heeft daarom ook geen kleur.

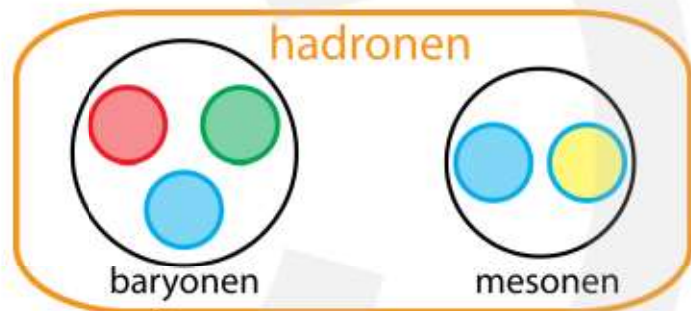


## 16.2 Samengestelde deeltjes

### Hadronen

Deeltjes die uit quarks bestaan heten **hadronen**. Zie figuur 5. Deeltjes met maar één quark (losse quarks) komen niet voor en kunnen ook niet worden gemaakt. Er zijn deeltjes met 3 quarks, **baryonen**, en deeltjes met 2 quarks, **mesonen**. In 2015 is voor het eerst een deeltje gemaakt dat uit 5 quarks bestaat (een pentaquark). Deze pentaquark was samengesteld uit 2 up-quarks, 1 down-quark, 1 charm-quark en 1 anti-charm-quark.

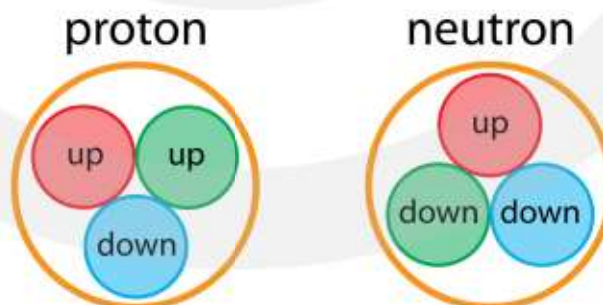
<b>hadron :</b>	<b>deeltje dat uit quarks bestaat</b>
<b>baryon :</b>	<b>drie quarks vormen een deeltje</b>
<b>meson :</b>	<b>één quark en één antiquark vormen een deeltje</b>



**Figuur 5**  
Hadronen, baryonen en mesonen.

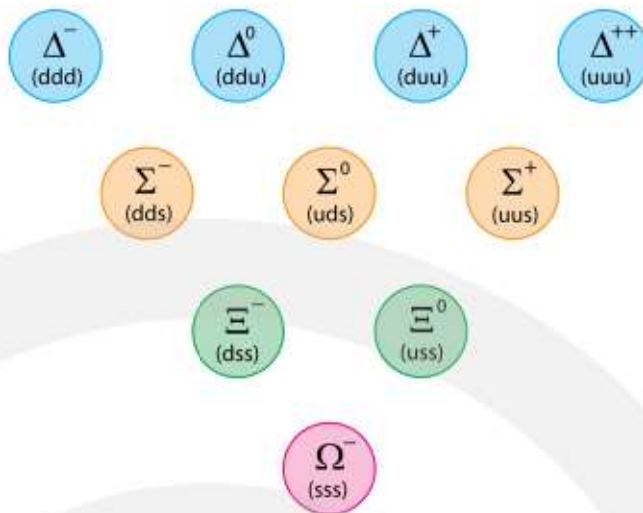
### – baryonen (deeltjes met 3 quarks) –

Protonen en neutronen zijn baryonen samengesteld uit up- en down quarks. Beide quarks dus uit Familie I. Zie figuur 6.



**Figuur 6**  
Het proton en het neutron bevatten up- en down-quarks.

Er bestaan ook baryonen met quarks uit verschillende families. In principe is iedere combinatie van quarks mogelijk. Los van de kleur kun je dus  $(6 \times 6 \times 6) / 3! = 36$  verschillende baryonen maken. Deeltjes die "vreemd" gedrag vertonen bevatten één of meer **strange** quarks. Hoe meer strange-quarks hoe "vreemder" het gedrag. In figuur 7 zie je de verzameling deeltjes samengesteld uit up-quarks, down-quarks en strange-quarks. De bovenste rij bevat deeltjes met alleen up- en down-quarks. Daaronder een rij met deeltjes die één strange-quark bevatten. Daaronder een rij met deeltjes die twee strange-quarks bevatten. Helemaal onderaan het  $\Omega^-$ -deeltje, dat drie strange-quarks bevat.



**Figuur 7**  
Verzameling van deeltjes met toenemende "vreemdheid".

### $\Delta$ -baryonen (delta baryonen)

$\Delta$ -baryonen zijn samengesteld uit up- en down-quarks. Het  $\Delta^0$ -deeltje is een aangeslagen toestand ( $I = 1\frac{1}{2}$ ) van het neutron ( $I = \frac{1}{2}$ ) en het  $\Delta^+$ -deeltje is een aangeslagen toestand ( $I = 1\frac{1}{2}$ ) van het proton ( $I = \frac{1}{2}$ ). Er zijn vier delta baryonen:

$$\Delta^{++} (uuu) \quad \Delta^+ (uud) \quad \Delta^0 (udd) \quad \Delta^- (ddd)$$

Om de elektrische lading van een baryon te berekenen tel je de elektrische ladingen van de quarks bij elkaar op. Voor de  $\Delta$ -baryonen vinden we:

$$\Delta^{++} \quad Q = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} + \frac{2}{3} \quad \Delta^+ \quad Q = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \quad \Delta^0 \quad Q = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \quad \Delta^- \quad Q = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3}$$

### $\Sigma$ -baryonen (sigma baryonen)

De  $\Sigma$ -deeltjes op de tweede rij van figuur 7 bevatten combinaties met u, d en s. Er zijn ook  $\Sigma$ -deeltjes die in plaats van strange een andere quark bevatten. De volledige groep met  $\Sigma$ -deeltjes is:

$$\begin{array}{lll} \Sigma_s^+ (uus) & \Sigma_s^0 (uds) & \Sigma_s^- (dds) \\ \Sigma_c^+ (uuc) & \Sigma_c^+ (udc) & \Sigma_c^0 (ddc) \\ \Sigma_b^+ (uub) & \Sigma_b^0 (udb) & \Sigma_b^- (ddb) \\ \Sigma_t^+ (uut)^* & \Sigma_t^+ (udt)^* & \Sigma_t^0 (ddt)^* \end{array}$$

\* Omdat het top-quark zeer snel vervalt kunnen deze  $\Sigma$ -baryonen niet worden gemaakt.

### $\Lambda$ -baryonen (labda baryonen)

Een andere combinatie van quarks zijn de labda-baryonen. Een labda-baryon bevat een up-quark, een down-quark en een derde quark uit een andere familie. Er zijn vier labda-baryonen:

$$\Lambda_s^0 (uds) \quad \Lambda_b^0 (udb) \quad \Lambda_c^+ (udc) \quad \Lambda_t^+ (udt)^*$$

\* Omdat het top-quark zeer snel vervalt kan het  $\Lambda_t^+$ -baryon niet worden gemaakt.

### $\Xi$ -baryonen (xi-baryonen)

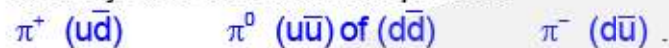
De xi-baryonen bevatten één quark uit familie I en twee quarks uit een andere familie. Bekende  $\Xi$ -baryonen zijn:

$$\Xi^- (dss) \quad \Xi^0 (uss) \quad \Xi_c^+ (usc) \quad \Xi_{cc}^{++} (ucc)$$

– mesonen (deeltjes met 2 quarks) –

**$\pi$ -mesonen (pionen)**

Mesonen die uitsluitend up- en down quarks bevatten zijn de  $\pi$ -mesonen, ook wel pionen genoemd. Pionen leven maar kort:  $\pi^+$  en  $\pi^-$  mesonen hebben een gemiddelde levensduur van  $2,6 \cdot 10^{-8}$  s. Het  $\pi^0$  meson leeft nog veel korter, namelijk  $8,4 \cdot 10^{-17}$  s. Er zijn drie verschillende pionen:

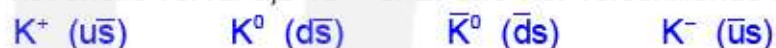


Mesonen bevatten een quark en een antiquark. Om de elektrische lading van een meson te berekenen tel je de elektrische ladingen van de quarks bij elkaar op. Voor de pionen vinden we:



**K-mesonen (kaonen)**

Een kaon bevat quarks afkomstig uit twee verschillende families. Up en down (en hun antideeltjes) worden gecombineerd met strange en anti-strange.  $K^+$  en  $K^-$  mesonen hebben een gemiddelde levensduur van  $1,2 \cdot 10^{-8}$  s. De  $K^0$  en  $\bar{K}^0$  mesonen kunnen op twee manieren uit elkaar vallen. Het langzame verval duurt  $5,1 \cdot 10^{-8}$  s en het snelle verval  $9,0 \cdot 10^{-11}$  s. Er zijn drie verschillende kaonen:



**D-mesonen**

De D-mesonen bevatten tenminste één (anti-) charm-quark. Hieronder zie je een aantal mogelijkheden:



**B-mesonen**

De B-mesonen bevatten tenminste één (anti-) bottom-quark. Hieronder zie je een aantal mogelijkheden:



## 16.3 Krachtdeeltjes

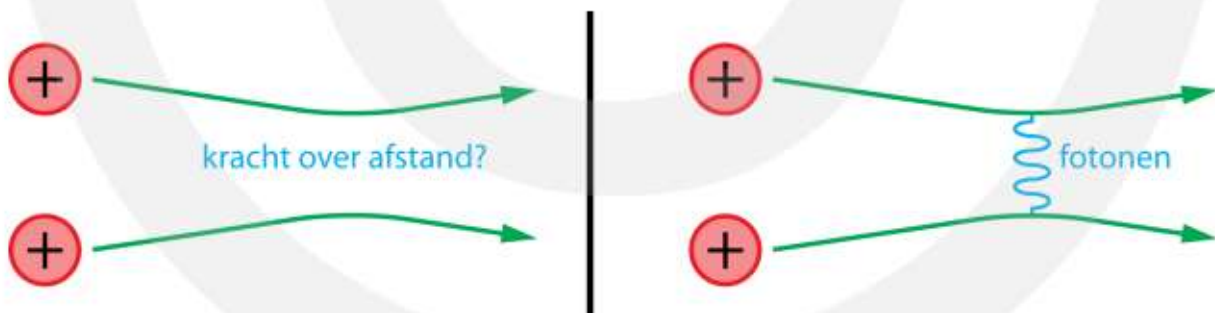
### Uitwisseling van krachtdeeltjes

Quarks en leptonen oefenen krachten op elkaar uit. In de klassieke natuurkunde gaan we er van uit dat een kracht over een afstand kan werken. Maar dit is in tegenpraak met de relativiteitstheorie. Voor de elektrische kracht tussen twee geladen voorwerpen geldt de wet van Coulomb:

$$F_{\text{el}} = f \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad \text{met} \quad f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Deze wet zegt dat als  $Q_1$  plotseling verandert, de kracht op  $Q_2$  op hetzelfde tijdstip ook verandert. Informatie moet hierbij op één tijdstip, dus sneller dan het licht, van voorwerp 1 naar voorwerp 2 gaan, en dat is volgens de relativiteitstheorie onmogelijk.

Vandaar dat in de moderne natuurkunde de kracht tussen twee voorwerpen wordt beschreven door het uitwisselen van deeltjes: **krachtdeeltjes**. Stel we schieten twee protonen schuin naar elkaar toe. Zie figuur 8. Als de protonen elkaar naderen neemt de afstotende kracht toe, waardoor hun banen worden afgebogen. In de klassieke natuurkunde werkt deze kracht op mysterieuze wijze over een afstand (figuur 8, links), maar in de moderne natuurkunde wordt de kracht overgebracht door het uitwisselen van een krachtdeeltje (figuur 8, rechts). Er is **wisselwerking** tussen de protonen, waarbij krachtdeeltjes als boodschapper optreden. Zoals je in figuur 8 ziet wordt de elektrische kracht overgebracht door de uitwisseling van fotonen.



**Figuur 8** De elektrische kracht wordt overgebracht door de uitwisseling van een foton.

In figuur 8 is de kracht afstotend. Je kunt je daarbij voorstellen dat een afstotende kracht het gevolg is van het overgooien van fotonen. Stel je voor dat twee schaatsers naar elkaar toe bewegen. Als één van hen een zwaar voorwerp overgooit naar de andere schaatser zie je dat de baan van beide schaatsers, net als in figuur 8, wordt afgebogen. Deze voorstelling is echter maar beperkt toepasbaar, want het is onduidelijk welk deeltje het foton uitzendt en wanneer hij dat doet. Bovendien wordt ook een aantrekkende kracht overgebracht door het uitwisselen van krachtdeeltjes.

**Quarks en leptonen oefenen kracht op elkaar uit door het uitwisselen van krachtdeeltjes.**

## Krachten

In de natuurkunde zijn er vier verschillende soorten krachten:

- de sterke kernkracht
- de elektromagnetische kracht (elektrische en magnetische kracht)
- de zwakke kernkracht
- de zwaartekracht (gravitatie)

Van deze krachten is de sterke kernkracht het sterkst, daarna komt de elektromagnetische kracht, vervolgens de zwakke kernkracht en tenslotte de zwaartekracht. Bij ieder van deze krachten hoort één of meerdere krachtdeeltjes.

sterke kernkracht	→	gluon
elektromagnetische kracht	→	foton
zwakke kernkracht	→	$W^+$ , $W^-$ en $Z^0$ deeltje
zwaartekracht	→	graviton ( <i>speculatief</i> )

### – sterke kernkracht –

De sterke kernkracht wordt overgebracht door krachtdeeltjes met de toepasselijke naam **gluonen** (Engels: glue = lijm). De sterke kernkracht heeft een reikwijdte van ongeveer  $10^{-15}$  m en is daarom alleen in een atoomkern aanwezig. Het is de kracht die ervoor zorgt dat quarks worden **opgesloten** in een hadron (meson of baryon). Een proton bevat twee up-quarks, met een elektrische lading van  $+2/3$  en één down-quark met elektrische lading  $-1/3$ . De sterke kernkracht is sterker dan de afstotende elektrische kracht tussen de up-quarks, zodat het proton niet uiteenvalt. De sterke kernkracht is ook betrokken bij het bijeenhouden van atoomkernen met meerdere protonen en neutronen. Bij de sterke kernkracht speelt **kleur** dezelfde rol als de **elektrische lading** bij de elektrische kracht. Omdat leptonen geen kleur hebben werkt de sterke kernkracht niet op leptonen. Gluonen hebben zelf ook een kleur en vandaar dat gluonen krachten op elkaar uitoefenen.

Een belangrijk verschil tussen de sterke kernkracht en de elektromagnetische kracht is dat de sterke kernkracht groter wordt als de afstand tussen de quarks toeneemt. Je kunt dit vergelijken met een spiraalveer of met een elastiek. Hoe groter de uitrekking is hoe sterker de terugwerkende kracht wordt.

### – elektromagnetische kracht –

De elektromagnetische kracht wordt overgebracht door **fotonen**. Fotonen koppelen alleen met elektrisch geladen deeltjes. Fotonen hebben zelf geen elektrische lading en ze hebben daarom, in tegenstelling tot de gluonen, geen interactie met elkaar. De elektromagnetische kracht is ook buiten een atoomkern aanwezig. Volgens de wet van Coulomb wordt de elektromagnetische kracht kleiner als de afstand toeneemt. De sterkte is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand. Dit heet de **omgekeerde kwadratenwet**. Behalve de afstand bepaalt de hoeveelheid **elektrische lading** van de deeltjes hoe groot de aantrekkende of afstotende kracht is.

De elektrische kracht zorgt ervoor dat atomen, met een positief geladen kern en negatief geladen elektronen kunnen bestaan. Zonder elektromagnetische kracht zouden er geen atomen zijn. De elektromagnetische kracht verklaart ook het bestaan

van moleculen en het verloop van scheikundige reacties. Op de schaal van atomen en moleculen is de elektromagnetische kracht de enige kracht die ertoe doet.

### – zwakke kernkracht –

Bij het overbrengen van de zwakke kernkracht zijn drie deeltjes betrokken:  $W^+$ ,  $W^-$  en  $Z^0$ .  $W$  komt van weak (zwak) en  $Z$  (zero charge) is er later bijgekomen.  $W^+$  en  $W^-$  hebben een elektrische lading en  $Z^0$  is neutraal.  $W^-$  is het antideeltje van  $W^+$ . De  $W$ -deeltjes hebben ook zwakke isospin. Ze gaan interacties aan met alle deeltjes die elektrische lading en zwakke isospin hebben.  $W$ -deeltjes hebben daarom ook interacties met elkaar.

De  $W$ -deeltjes en het  $Z^0$  leven maar heel kort, ongeveer  $3 \cdot 10^{-25}$  s en kunnen daarom niet rechtstreeks worden waargenomen. Net als de sterke kernkracht heeft ook de zwakke kernkracht een reikwijdte van ongeveer  $10^{-15}$  m en is daarom alleen in een atoomkern aanwezig. Omdat leptonen geen kleur hebben speelt de zwakke kernkracht een grote rol bij processen waarbij leptonen zijn betrokken. Zo is de zwakke kernkracht verantwoordelijk voor het  $\beta^-$  en  $\beta^+$  verval van een atoomkern. Hoe dit is zijn werk gaat wordt in de volgende paragraaf uitgelegd.

### – zwaartekracht –

De zwaartekracht is veruit de zwakste kracht die er bestaat. Vergelijken we bijvoorbeeld de elektromagnetische kracht met de zwaartekracht tussen twee protonen dan is de zwaartekracht  $10^{36}$  keer zwakker. De zwaartekracht heeft een heel ander karakter dan de drie andere krachten en past daarom niet in de theorie van elementaire deeltjes. Volgens de relativiteitstheorie is zwaartekracht maar schijn, want het gevolg van de vervorming van ruimtetijd. Een boodschapper die de kracht overbrengt is hiervoor niet nodig. Er wordt wel gesuggereerd dat er ook bij zwaartekracht een deeltje wordt uitgewisseld: het **graviton**. Maar het graviton is nog nooit is waargenomen en is daarom nog erg speculatief.

#### VOORBEELD krachten tussen twee protonen

We beschouwen twee proton op een afstand van  $10^{-15}$  m.

Voor de elektrische kracht tussen de protonen vinden we:

$$\bullet F_{el} = f \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad \text{met } Q_1 = Q_2 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad | \quad r = 10^{-15} \text{ m}$$

$$\bullet F_{el} = 8,9876 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} = 2,3 \cdot 10^2 \text{ N}$$

Voor de zwaartekracht tussen de protonen vinden we:

$$\bullet F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad \text{met } m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad | \quad r = 10^{-15} \text{ m}$$

$$\bullet F_G = 6,67408 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(10^{-15})^2} = 1,86 \cdot 10^{-34} \text{ N}$$

Voor de verhouding tussen  $F_{el}$  en  $F_G$  vinden we:

$$\bullet \frac{F_{el}}{F_G} = \frac{2,3 \cdot 10^2}{1,86 \cdot 10^{-34}} = 1,2 \cdot 10^{36}$$

In het bovenstaand voorbeeld is te zien hoe sterk de elektromagnetische kracht is. Protonen in een atoomkern stoten elkaar af met 230 N! Gelukkig is de sterke kernkracht honderd keer sterker, zodat atoomkernen stabiel zijn. Tabel 2 geeft een overzicht van de relatieve sterkten van de vier krachten op een afstand van  $10^{-15}$  m. De sterke kernkracht tussen twee protonen in een atoomkern stellen we op 1.

Tabel 2 Relatieve sterkte van de krachten.

kracht	krachtdeeltje	relatieve sterkte
sterke kernkracht	gluon	1
elektromagnetische kracht	foton	$10^{-2}$
zwakke kernkracht	$W^+ W^- Z^0$	$10^{-6}$
zwaartekracht	graviton*	$10^{-38}$

\* Het graviton is nog nooit waargenomen.

## Eigenschappen van krachtdeeltjes

Tabel 3 is een overzicht van de massa, de elektrische lading, de zwakke isospin en de kleur van de krachtdeeltjes. Behalve het graviton hebben alle krachtdeeltjes een zwakke isospin van 1 en dus twee keer zoveel isospin als een quark of een lepton. Het graviton heeft een isospin van 2. Deeltjes met heeltallige isospin (0, 1, 2, etc.) zijn **bosonen** en hebben bijzondere kwantummechanische eigenschappen. Alle krachtdeeltjes zijn dus bosonen.

Tabel 3 Eigenschappen van krachtdeeltjes.

kracht-deeltje	kracht	massa (GeV/c <sup>2</sup> )	elektrische lading (e)	zwakke-isospin $I_3$	kleur
gluon	sterke kernkracht	0	0	0	r g b
foton	elektromagn. kracht	0	0	0	–
$Z^0$	zwakke kernkracht	91,19	0	0	–
$W^+$	zwakke kernkracht	80,39	+1	+1	–
$W^-$	zwakke kernkracht	80,39	-1	-1	–
graviton*	zwaartekracht	0	0	0	–

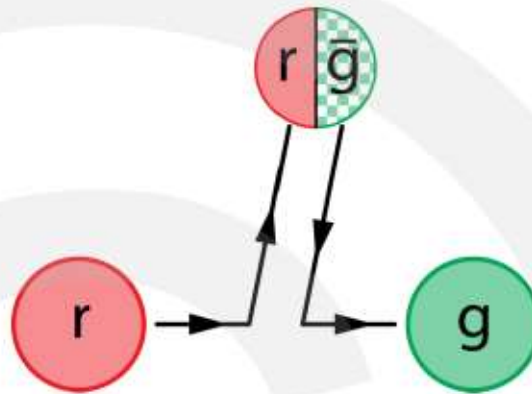
\* Het graviton is nog nooit waargenomen.

## Kleur

Gluonen verzorgen de wisselwerking tussen quarks via de kleur. Hierbij krijgen de quarks een andere kleur. Het gaat als volgt. Een rode quark kan zich omkleuren naar groen door het uitzenden van een gluon. Gluonen dragen een kleur en een anti-

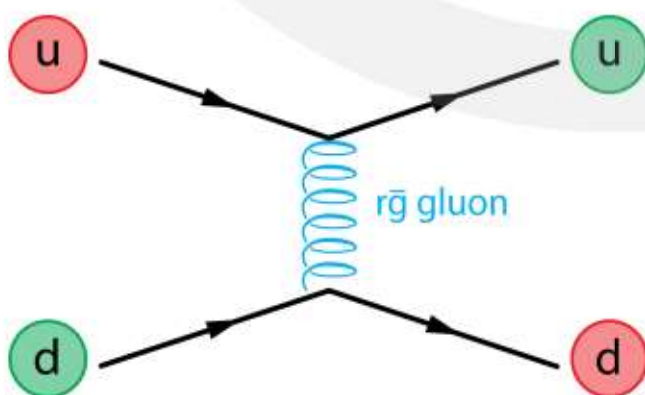
kleur. In ons voorbeeld verliest de rode quark zijn rode kleur en krijgt het een groene kleur. Het gluon dat hij daarvoor moet uitzenden heeft een rode en een anti-groene kleur. Je kunt je voorstellen dat het gluon de rode kleur afvoert en de groene kleur aanvoert. Het aanvoeren van de groene kleur is hetzelfde als het afvoeren van de antigroene kleur. In figuur 9 wordt dit proces uitgebeeld. Het geblokte deel van het gluon stelt de anti-groene kleur voor. Anti-groen kun je voorstellen als de kleur die je overhoudt als je de groene kleur uit wit verwijdert.

**Figuur 9**  
Een rode quark zendt een  $r\bar{g}$  gluon uit en wordt daardoor een groene quark.

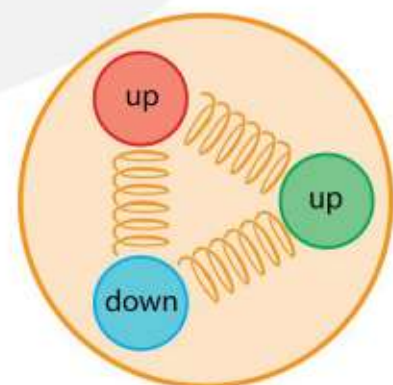


Quarks wisselen voortdurend gluonen uit, waarbij ze steeds van kleur veranderen. Dit uitwisselen van gluonen veroorzaakt de sterke kernkracht. In figuur 10 zie je hoe een rode up-quark zijn kleur uitwisselt met een groene down-quark. Het antideeltje van een gluon is ook een gluon. Zo is het (groen | anti-rood) gluon het antideeltje van het (rood | anti-groen) gluon. Op deze manier kun je negen combinaties maken. Gek genoeg bestaan er maar acht verschillende gluonen. De reden waarom er eentje ontbreekt is moeilijk te begrijpen. Het ontbrekende gluon zou evenveel van iedere kleur moeten bevatten, en dat is niet toegestaan.

In figuur 11 zie je een proton met gluonen die de sterke kernkracht verzorgen. De spiraalveren geven aan dat de sterke kernkracht groter wordt als de afstand tussen de quarks toeneemt. Figuur 11 suggereert dat er maar drie gluonen aanwezig zijn in een proton, maar dat is niet het geval. Zoals hieronder wordt uitgelegd moet je een proton opvatten als een klont van gluonen waarin drie kleine quarks rondzwemmen.



**Figuur 10** Een rode up-quark wisselt kleur uit met een groene down-quark. Een  $r\bar{g}$  gluon wordt hierbij uitgewisseld.



**Figuur 11** Proton met twee up-quarks en één down quark, gebonden door gluonen.



## Bindingsenergie

De massa van een proton is  $938,3 \text{ MeV}/c^2$ . Deze massa bestaat uit:

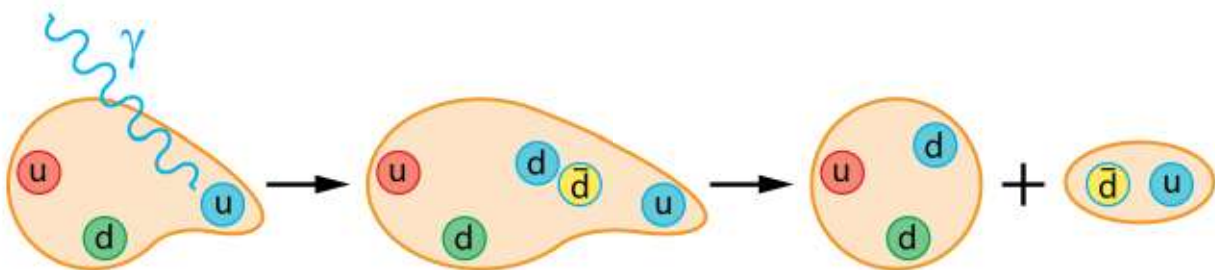
- de rustmassa's van de quarks
- de rustmassa's van de gluonen
- de bindingsenergie

Het up-quark heeft een rustmassa van  $2,4 \text{ MeV}/c^2$  en het down-quark een rustmassa van  $4,8 \text{ MeV}/c^2$ . Gluonen hebben geen rustmassa. Dat wil zeggen dat de bindingsenergie correspondeert met een massa van  $938,3 - 2 \cdot 2,4 - 4,8 = 928,7 \text{ MeV}/c^2$ . Hieraan is te zien dat een proton moet worden opgevat als een klont bindingsenergie (gluonen) met drie kleine deeltjes erin. Net als een atoom bestaat ook een proton voornamelijk uit lege ruimte. Voor een elektron of een neutrino is het geen probleem om dwars door een proton heen te gaan. Lege ruimte (geen materiedeeltjes) gevuld met energie is moeilijk voor te stellen. Het is één van de mysteries waarop de huidige natuurkunde nog niet goed grip heeft.

Aan het bovenstaande zie je dat een proton veel meer bindingsenergie heeft dan een atoom. Een waterstofatoom bestaat uit een proton en een elektron. De bindingsenergie tussen het proton en het elektron is  $13,6 \text{ eV}$  en de bindingsenergie in het proton is  $928,7 \cdot 10^6 \text{ eV}$ . Een verklaring hiervoor is dat gluonen niet alleen krachten uitoefenen op quarks, maar ook op elkaar. Gluonen wisselwerken met kleur en ze hebben zelf ook kleur. Dat is een verschil met fotonen, want die wisselwerken met elektrisch geladen deeltjes, maar hebben zelf geen elektrische lading. Omdat gluonen krachten op elkaar uitoefenen wordt wel eens gesuggereerd dat een deeltje met alleen gluonen ook kan bestaan. Maar zo'n deeltje, "gluonium" of "glueball" genoemd is nog nooit waargenomen.

## Opsluiting van quarks

Quarks komen niet als los deeltje voor. Ze zijn **opgesloten** in een hadron. De reden hiervan is de manier waarop de sterke kernkracht werkt. Stel we schieten een foton met zeer veel energie af op een proton. Als de energie groot genoeg is dringt het foton in het proton en wordt het geabsorbeerd door één van de drie quarks. Dit quark wordt weggetrokken van de twee andere quarks, waardoor de bindingsenergie toeneemt. Als de afstand te groot is breekt de binding, waarbij de bindingsenergie vrijkomt. Uit deze energie ontstaan twee nieuwe quarks. In figuur 12 zie je hoe een proton door het absorberen van een foton uiteenvalt in een neutron en een  $\pi^+$ -meson. Uit de vrijgekomen bindingsenergie ontstaat een down- en een anti-down quark. Het anti-down quark heeft de anti-blauwe kleur, aangegeven met geel.



**Figuur 12** Opsluiting van quarks. Als de afstand tussen twee quarks te groot wordt breekt de binding. Uit de vrijkomende bindingsenergie ontstaan twee nieuwe quarks.

## Het higgsdeeltje

Tellen we het aantal quarks, leptonen en krachtdeeltjes bij elkaar op dan komen we op 36 quarks + 12 leptonen + 12 krachtdeeltjes = 60 deeltjes. Maar daarmee zijn we er nog niet. Er is nog één deeltje dat we moeten behandelen: het higgsdeeltje wat is genoemd naar Peter Higgs (Engeland, 1929 – heden). Het higgsdeeltje is een elementair deeltje, maar het is geen quark, geen lepton en ook geen krachtdeeltje. Het is een uniek deeltje waarvan er maar één bestaat. Het higgsdeeltje heeft als symbool  $H^0$  en heeft de volgende eigenschappen:

massa  $125 \text{ GeV}/c^2$  | elektrische lading 0 | isospin 0 | kleur geen |  
levensduur  $1,56 \cdot 10^{-22} \text{ s}$

Het higgsdeeltje is nodig om te begrijpen waarom quarks, leptonen, W-deeltjes en het  $Z^0$ -deeltje massa hebben. In de wiskundige beschrijving hebben quarks, leptonen en krachtdeeltjes namelijk geen massa. Maar experimenten wijzen uit dat quarks, leptonen en sommige krachtdeeltjes weldegelijk massa hebben. Hieruit volgt dat quarks, leptonen en krachtdeeltjes wisselwerking hebben met "iets" dat overal in het heelal aanwezig is. Dat "iets" is het higgsveld en het higgsdeeltje is hiervan de draager. Deeltjes krijgen massa omdat ze koppelen met het higgsveld. Hierdoor zijn ze moeilijker in beweging te krijgen. Er is kracht nodig om ze een versnelling te geven en uit  $\Sigma F = m \cdot a$  volgt dan dat ze massa hebben. Gluonen en fotonen koppelen niet met het higgsveld en hebben daarom geen massa.

## Standaardmodel

De eigenschappen van quarks en leptonen en de manier waarop deze deeltjes krachten op elkaar uitoefenen wordt beschreven met een natuurkundig model dat het **standaardmodel** wordt genoemd. De ontwikkeling van het standaardmodel heeft meer dan 100 jaar geduurd. Het eerste elementaire deeltje, het elektron, is ontdekt in 1897 en het laatste elementaire deeltje, het higgsdeeltje in 2012.

Met het standaardmodel kun je uitrekenen wat de kans is dat een bepaalde gebeurtenis plaatsvindt. Het is wiskundig gereedschap. De wiskunde is erg moeilijk en is gebaseerd op het maken van een benadering. Je verwaarloost een aantal mogelijkheden en rekent uit wat er gebeurt. Als je niet tevreden bent over de nauwkeurigheid van je antwoord, verwaarloos je minder mogelijkheden, waardoor je berekening moeilijker maar nauwkeuriger wordt.

Een probleem bij deze berekeningen is dat er vaak onzinnige antwoorden uitkomen, zoals een kans groter dan 1 of een deeltje met oneindig veel energie. De wiskundige methode om onzinnige antwoorden uit te sluiten is om de ene oneindigheid weg te strepen tegen een andere oneindigheid. Dit heet **renormaliseren**. Hierbij maak je gebruik van de vrijheid die er is om een wiskundige berekening uit te voeren. Je kunt als het ware aan wiskundige knoppen draaien, en dan draai je net zolang tot de oneindigheden tegen elkaar wegvallen.

Het renormaliseren van de zwakke kernkracht heeft heel wat moeite gekost. Uiteindelijk hebben Martinus Veltman (Nederland, 1931– ) en Gerard 't Hooft (Nederland, 1946– ) dit probleem rond 1970 opgelost, waarvoor ze in 1999 de Nobelprijs hebben gekregen.

## 16.4 Feynmandiagrammen

### Elektromagnetische wisselwerking

Alleen de elementaire deeltjes van Familie I zijn stabiel. De deeltjes van de andere families vallen spontaan uit elkaar, waarbij Familie I-deeltjes en fotonen ontstaan. Van de krachtdeeltjes is alleen het foton stabiel. Gluonen, de W-deeltjes en het  $Z^0$ -deeltje vallen uit elkaar, waarbij uiteindelijk Familie I-deeltjes of fotonen ontstaan.

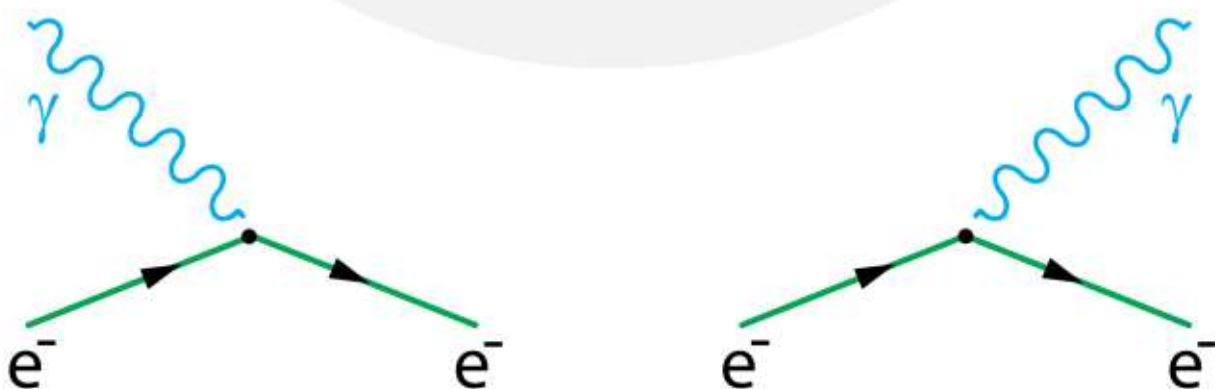
Er zijn veel verschillende reacties mogelijk en om deze reacties in beeld te brengen worden **reactiediagrammen** gebruikt. Deze diagrammen zijn in 1948 geïntroduceerd door Richard Feynman (Verenigde Staten, 1918–1988) en worden daarom **feynmandiagrammen** genoemd. In een feynmandiagram loopt de tijd van links naar rechts. Links staan de deeltjes vóór de reactie en rechts na de reactie. De plaats waar twee deeltjes elkaar tegenkomen heet een **vertex**. Bij iedere vertex vindt er een gebeurtenis plaats. Bij een vertex (gebeurtenis) is altijd een krachtdeeltje betrokken. Met een pijl wordt aangegeven of het een deeltje of een antideeltje betreft. Bij een deeltje wijst de pijl in de richting waarin het wordt aangevoerd en afgevoerd. Bij een antideeltje wijst de pijl in tegengestelde richting. Wordt een antideeltje afgevoerd, dan wijst de pijl naar de vertex.

#### Feynmandiagram

- de tijd gaat van links naar rechts
- bij een gebeurtenis is altijd één krachtdeeltje betrokken
- met een pijl wordt de aanvoer en afvoer van deeltjes aangegeven
- bij antideeltjes is de pijl omgekeerd

### – uitzenden en ontvangen van fotonen –

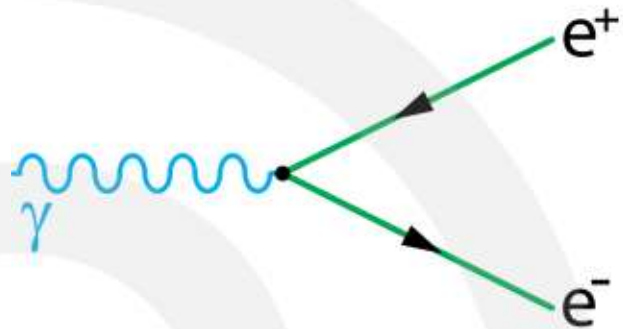
In de 19<sup>e</sup> eeuw is ontdekt dat op en neer bewegend elektronen fotonen uitzenden. Dit gebeurt in een antenne bij het uitzenden van elektromagnetische straling. De fotonen kunnen verderop weer opgevangen worden, waarbij ze elektronen in beweging zetten. In figuur 13 geven de pijlen de aanvoer en afvoer van elektronen aan.



**Figuur 13** Links: een elektron absorbeert een foton. Rechts: een elektron zendt een foton uit. Deze gebeurtenissen vinden plaats bij het ontvangen en uitzenden van bijvoorbeeld radiosignalen.

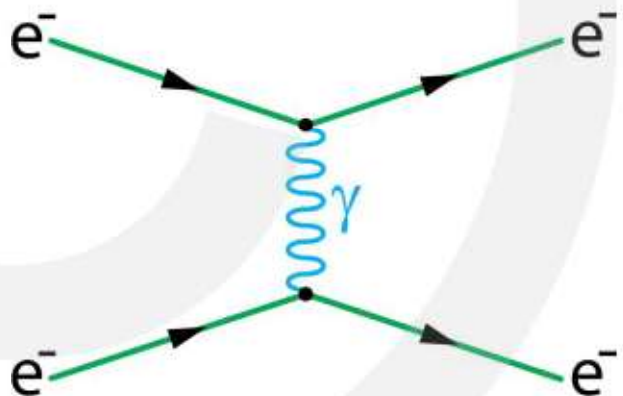
Uitgaande van figuur 13 links, kunnen we het ingaand elektron verplaatsen naar rechts. In plaats van een ingaand deeltje wordt het een uitgaand deeltje. Zie figuur 14. Een ingaand foton produceert een elektron en een deeltje dat veel op een elektron lijkt, behalve dat de pijl in tegengestelde richting wijst. De pijl geeft aan dat er negatieve lading inwaarts stroomt, hetgeen gezien kan worden als uitgaande positieve lading. Dit uitgaande deeltje is een positron, met lading +1, het antideeltje van het elektron. Zoals je ziet verandert de hoeveelheid elektrische lading niet. Vóór de reactie is de lading nul (foton) en na de reactie ook (elektron plus positron).

**Figuur 14**  
Een ingaand foton wordt omgezet in een uitgaand elektron en een uitgaand positron.

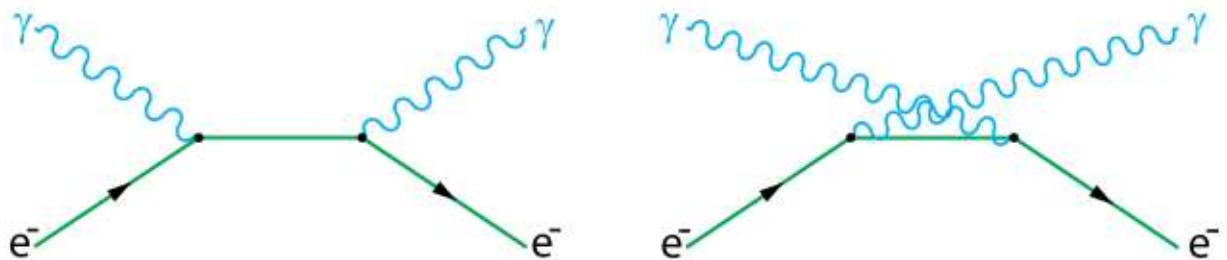


De feynmandiagrammen kunnen gecombineerd worden. Bijvoorbeeld een elektron dat een foton uitzendt dat door een ander elektron geabsorbeerd wordt. Zie figuur 15. Het uitgebeelde proces heet **Coulombverstrooiing**.

**Figuur 15**  
Twee inkomende elektronen wisselen een foton uit en gaan daarna in een andere richting verder.



Een ander bekend proces is **Comptonverstrooiing**. Zie figuur 16. Een inkomend foton wordt geabsorbeerd door een elektron. Even later zendt dit elektron een ander foton uit dat een andere energie kan hebben. Het inkomende foton kan een kortere golflengte hebben (bijvoorbeeld blauw licht) en het uitgaande foton een langere golflengte (rood licht). Er zijn twee mogelijkheden. Eerst wordt het blauwe foton geabsorbeerd en daarna het rode foton uitgezonden. Of, eerst wordt het rode foton uitgezonden en daarna het blauwe foton geabsorbeerd.



**Figuur 16** Comptonverstrooiing.

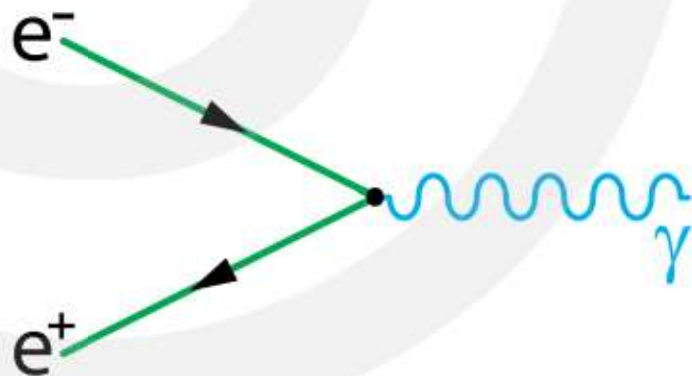
## Kruisen (crossing)

In figuur 13 zie je dat het ontvangen van een foton en het uitzenden van een foton, beide mogelijk zijn. Dit geldt in het algemeen. Bestaat er een proces waarbij een bepaald deeltje wordt ontvangen, dan bestaat het proces waarbij het geassocieerde antideeltje wordt uitgezonden ook. Dit betekent dat je in een feynmandiagram altijd een ingaand deeltje kunt vervangen door het uitgaand antideeltje om een nieuw diagram te maken. Het omgekeerde, een uitgaand deeltje vervangen door een ingaand antideeltje, mag ook.

### Kruisen:

- ingaand deeltje mogelijk → uitgaand antideeltje ook mogelijk
- uitgaand deeltje mogelijk → ingaand antideeltje ook mogelijk

Omdat een foton zijn eigen antideeltje is bestaat voor ieder proces waarbij een foton wordt opgenomen een geassocieerd proces waarbij een foton wordt uitgezonden. Door te kruisen kan het proces van figuur 14 worden verkregen uit figuur 13. Je vervangt daarbij het ingaande elektron door een uitgaand anti-elektron (positron). Kruisen we bij figuur 14 alle deeltjes dan krijgen we figuur 17. Een ingaand positron en ingaand elektron komen samen met een uitgaand foton als resultaat. Dit wordt **annihilatie** genoemd. In figuur 17 ontstaat er één foton, maar omdat zowel de energie als de impuls niet mogen veranderen ontstaan er meestal twee fotonen. Over het behoud van energie en van impuls leer je in de volgende paragraaf meer.



**Figuur 17**  
Annihilatie van een positron  
en een elektron.

Door bij een feynmandiagram alle deeltjes te kruisen krijg je een proces dat terugloopt. Voor ieder mogelijk proces is het teruglopende proces (gespiegeld in de tijd) ook mogelijk. Op de schaal van elementaire deeltjes zijn alle processen **omkeerbaar (reversibel)**.

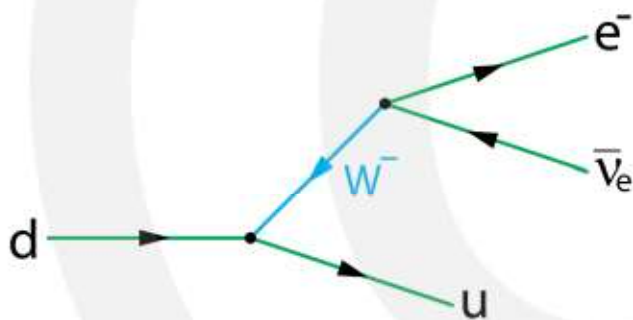
Voor ieder mogelijk proces is het omgekeerde proces ook mogelijk.

## Zwakke kernkracht

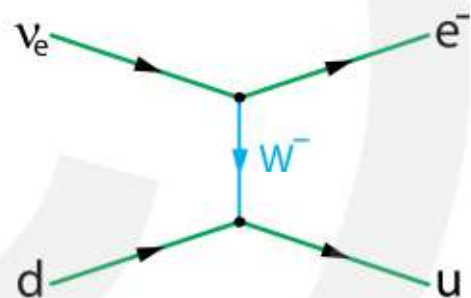
Feynmandiagrammen maken ook de zwakke kernkracht inzichtelijk. Een niet gebonden (los) neutron is niet stabiel en vervalt met een halveringstijd van 10 minuten. Bij dit verval komt  $\beta^-$  straling vrij. De vergelijking is:  ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + {}_0^0\bar{\nu}_e$ . Het  $\beta^-$ -verval is in 1896 door Henri Becquerel (Frankrijk, 1852 – 1908) ontdekt, maar dat hierbij ook een anti-neutrino wordt uitgezonden is pas veel later begrepen.

Bij het  $\beta^-$ -verval wordt een down-quark omgezet in een up-quark. De zwakke kernkracht speelt hierbij een belangrijke rol. Het feynmandiagram van deze reactie zie je in figuur 18. Het inkomend deeltje is een down-quark. Het zendt een  $W^-$  krachtdeeltje uit, waardoor het down-quark transformeert tot up-quark. Het  $W^-$ -deeltje leeft maar kort en heeft een halveringstijd van ongeveer  $3 \cdot 10^{-25}$  s. Het valt uiteen in een elektron en een anti-elektron-neutrino. Omdat het  $W^-$  deeltje het antideeltje is van  $W^+$  is in figuur 18 de richting van de pijl omgekeerd.

We kunnen het diagram kruisen door het uitgaande anti-neutrino te vervangen door een ingaand neutrino. Zie figuur 19. Dit proces biedt de mogelijkheid om elektron-neutrino's indirect waar te nemen. Het indirect waarnemen en verder onderzoeken van neutrino's is op dit moment een belangrijk thema in de natuurkunde.



Figuur 18  $\beta^-$  verval.

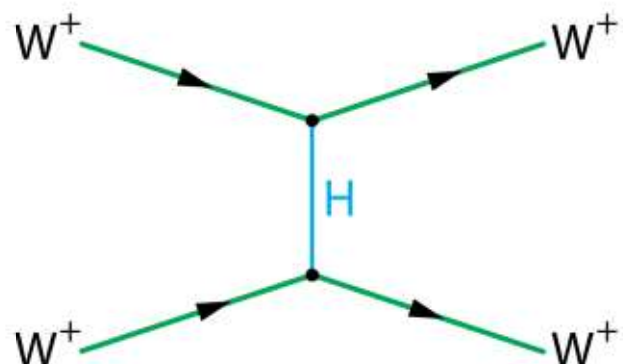


Figuur 19 Proces verkregen uit  $\beta^-$  verval door het anti-neutrino te kruisen.

## Het higgsdeeltje

Het higgsdeeltje speelt een rol bij de kracht die  $W$ -deeltjes op elkaar uitoefenen. De grootte van deze kracht hangt af van de massa van de  $W$ -deeltjes. Zie figuur 20. Omdat een  $W$ -deeltje maar  $3 \cdot 10^{-25}$  s leeft en een higgsdeeltje maar  $1,56 \cdot 10^{-22}$  s kan dit proces niet rechtstreeks worden waargenomen.  $W$ -deeltjes en het higgsdeeltje leven te kort om een detector te bereiken.

Figuur 20 Interactie van  $W^+$  deeltjes waarbij een higgsdeeltje is betrokken.

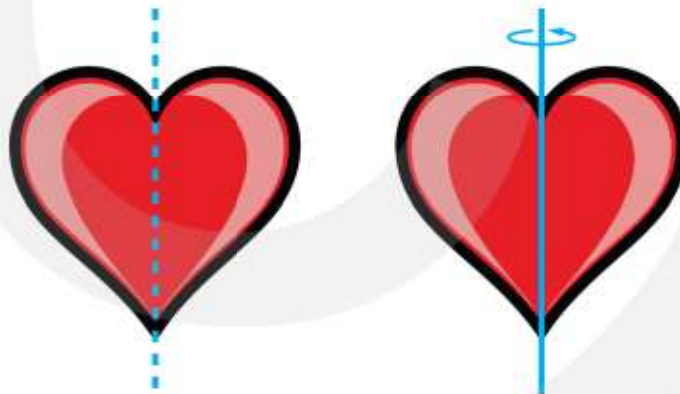


## 16.5 Behoudswetten

### Symmetrie

Niet alle processen die je kunt bedenken zijn mogelijk. De processen moeten namelijk voldoen aan **behoudswetten**, die worden opgelegd door de aanwezigheid van **symmetrie**. Symmetrie is aanwezig als je een bepaalde handeling verricht waarbij de situatie vóór en na de handeling niet waarneembaar verandert. Als voorbeeld nemen we een hart. Zie figuur 21. Als we het hart spiegelen in de gestippelde lijn zien we hetzelfde hart. Er is een handeling verricht, maar het verschil vóór en na de handeling is niet waarneembaar. We kunnen het hart ook 180 graden draaien om de getekende draaias, en opnieuw is het verschil vóór en na de handeling niet waarneembaar. En als er geen verschil waarneembaar is, dan is er natuurkundig ook geen verschil.

Als er symmetrie is blijft er iets behouden en levert dat in de natuurkunde een **behoudswet** op. Emmy Noether (Duitsland, 1882–1935) heeft in 1915 wiskundig bewezen dat achter iedere behoudswet een symmetrie schuilt. Dit inzicht hoort tot de grootste natuurkundige ontdekkingen van de vorige eeuw. Het belang van dit inzicht is pas na haar dood doorgedrongen, waardoor Emmy Noether veel minder beroemd is geworden dan ze zou moeten zijn.



**Figuur 21**  
Spiegelsymmetrie en  
rotatiesymmetrie.

### – behoud van massa-energie –

Een behoudswet die je al kent is de **wet van behoud van energie**. De symmetrie die hierachter zit is **translatiesymmetrie in de tijd**. Ieder natuurkundig experiment dat op tijdstip  $t$  wordt uitgevoerd, kan in principe ook op tijdstip  $t + \Delta t$  worden uitgevoerd en geeft dan bij gelijke omstandigheden exact hetzelfde resultaat. Omdat massa en energie via  $E = m \cdot c^2$  aan elkaar zijn gerelateerd moet de deze behoudswet worden gezien als **wet van behoud van massa-energie**. De snelheid van een elementair deeltje is meestal in de buurt van de lichtsnelheid. We moeten dan de formules uit de relativiteitstheorie gebruiken. Dit komt in de volgende paragraaf aan de orde.

### – behoud van impuls –

Er is ook **translatiesymmetrie in de ruimte**. Ieder natuurkundig experiment dat op plaats  $x$  wordt uitgevoerd, kan in principe ook op plaats  $x + \Delta x$  worden uitgevoerd en geeft dan bij gelijke omstandigheden hetzelfde resultaat. De behoudswet die hieruit voortkomt is de **wet van behoud van impuls**. De impuls van een voorwerp is gelijk

aan de massa keer de snelheid:  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ . Omdat snelheid een vectorgrootheid is met drie richtingen ( $v_x, v_y, v_z$ ) is de impuls ook een vectorgrootheid. Vandaar het pijltje boven het symbool  $\vec{p}$ . Omdat de genoemde translatie niet alleen in de x-richting maar ook in de y- en in de z-richting kan worden uitgevoerd zijn er in feite drie behoudswetten, voor iedere richting één. Net als bij het behoud van massa-energie hebben we de relativiteitstheorie nodig om impulsbehoud bij hoge snelheid toe te passen. In de volgende paragraaf komen we hierop terug.

### – behoud van impulsmoment –

Naast translatiesymmetrie is er ook **rotatiesymmetrie in de ruimte**. We kunnen ons voorstellen dat alles wordt gedraaid om een draaias zonder dat hierdoor iets verandert. De behoudswet die hieruit voortkomt is de **wet van behoud van impulsmoment**. Het impulsmoment  $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$  van een voorwerp is gelijk aan de straal van de cirkel waarover gedraaid wordt keer de impuls. Omdat je in drie verschillende richtingen kunt draaien (om de x-as, om de y-as en om de z-as) zijn er in feite drie behoudswetten, voor iedere draairichting één.

### – behoud van elektrische lading –

Elektrische lading kan niet ontstaan en kan niet verdwijnen. Dit geeft de **wet van behoud van elektrische lading**. De achterliggende symmetrie is moeilijker te begrijpen maar heeft te maken met de vrijheid die je hebt om het nulpunt van elektrische potentiaal te kiezen. Bij een spanningsbron kijken we alleen naar het verschil in potentiaal. De minpool heeft bijvoorbeeld 0 volt en de pluspool 12 volt. Maar we kunnen de minpool ook op 5 volt stellen en de pluspool op 17 volt. Natuurkundig verandert er dan niets.

### – behoud van quarkgetal –

Het quarkgetal  $A$  is het aantal quarks min het aantal antiquarks dat aanwezig is. Bij iedere reactie is het quarkgetal behouden. Tel je het aantal quarks min het aantal antiquarks voor de reactie dan is dit gelijk aan het aantal quarks min het aantal antiquarks na de reactie.  $A = n_{\text{quarks}} - n_{\text{antiquarks}}$ . Het behoud van quarkgetal geeft aan dat een quark en een antiquark alleen als koppeltje kunnen ontstaan of verdwijnen.

**Het quarkgetal  $A = n_{\text{quarks}} - n_{\text{antiquarks}}$  is vóór en na de reactie gelijk.**

Het **baryongetal** is gebaseerd op het quarkgetal. Omdat het quarkgetal behouden blijft is ook het baryongetal behouden. Een baryon is een deeltje dat uit 3 quarks bestaat. Het baryongetal is het aantal baryonen min het aantal anti-baryonen:

$$B = \frac{1}{3}(n_{\text{quarks}} - n_{\text{antiquarks}})$$

Als alleen (massa-energie)-behoud, impulsbehoud, impulsmomentbehoud en ladingsbehoud zouden bestaan zou de reactie:  $p + p \rightarrow p + p + n$  ( $p = \text{proton}$ ,  $n = \text{neutron}$ ) kunnen optreden als de protonen met grote snelheid op elkaar botsen. Maar deze reactie gebeurt niet, want vóór de pijl is het baryongetal 2 en na de pijl 3. De reactie:  $p + p \rightarrow p + p + n + \bar{n}$  is wel mogelijk, want aan beide kanten is het baryongetal 2.



## – behoud van leptongetal –

Iedere familie bevat twee leptonen en de bijbehorende antideeltjes. Het leptongetal is het aantal leptonen min het aantal anti-leptonen van dezelfde familie.

**Leptongetal L: aantal leptonen min aantal anti-leptonen van dezelfde familie.**

**Het leptongetal van iedere familie is vóór en na de reactie gelijk.**

De reactie:  $n \rightarrow p + e^-$  treedt niet op, want het elektron-leptongetal vóór de reactie is 0 en na de reactie 1. In plaats daarvan gebeurt:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  want hierbij is het elektron-leptongetal vóór en na de reactie nul. De reactie  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_\mu$  treedt niet op, want na de reactie is het elektron-leptongetal 1 en het muon-leptongetal -1.

Inmiddels is duidelijk geworden dat behoud van leptongetal niet altijd waar is. Het blijkt dat de neutrino's van de verschillende families spontaan in elkaar overgaan. Dit noem je **neutrino-oscillatie**:  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ . De achterliggende theorie is moeilijk, maar uit het feit dat neutrino's voortdurend in elkaar overgaan en dat hierbij maar drie verschillende neutrino's zijn betrokken mag je concluderen dat er geen vierde familie bestaat. Volgens de huidige inzichten is het standaardmodel compleet.

**Tabel 4** De behoudswetten.

Grootheid	Behoudswet	Symmetrie
energie	$\Sigma E_{\text{voor}} = \Sigma E_{\text{na}}$	translatie van tijd
impuls	$\Sigma p_{x \text{ voor}} = \Sigma p_{x \text{ na}}$ $\Sigma p_{y \text{ voor}} = \Sigma p_{y \text{ na}}$ $\Sigma p_{z \text{ voor}} = \Sigma p_{z \text{ na}}$	translatie van plaats
impulsmoment	$\Sigma L_{x \text{ voor}} = \Sigma L_{x \text{ na}}$ $\Sigma L_{y \text{ voor}} = \Sigma L_{y \text{ na}}$ $\Sigma L_{z \text{ voor}} = \Sigma L_{z \text{ na}}$	rotatie om draaias
elektrische lading	$Q_{\text{voor}} = Q_{\text{na}}$	nulpunt van potentiaal
quarkgetal	$A_{\text{voor}} = A_{\text{na}}$	onbekend
leptongetal*	$L_{e \text{ voor}} = L_{e \text{ na}}$ $L_{\mu \text{ voor}} = L_{\mu \text{ na}}$ $L_{\tau \text{ voor}} = L_{\tau \text{ na}}$	onbekend

\* Behoud van leptongetal geldt niet altijd, bijvoorbeeld niet bij neutrino-oscillaties.

## Behoud van massa-energie

Als voorbeeld van het behoud van massa-energie kijken we naar het uiteenvallen van een neutron, waarbij een elektron vrijkomt ( $\beta^-$ -verval). De reactievergelijking is:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ . Zie ook figuur 18. De rustmassa's van de deeltjes zijn:

Deeltje	Rustmassa (MeV/c <sup>2</sup> )
n	939,57
p	938,27
e <sup>-</sup>	0,511
anti- $\nu_e$	0 (?)

Massa vóór de reactie is 939,57 en na de reactie  $938,27 + 0,511 = 938,78$  MeV/c<sup>2</sup>. Vóór de reactie is er 0,79 MeV/c<sup>2</sup> méér massa dan na de reactie. De reactie kan daarom spontaan verlopen, zoals inderdaad wordt waargenomen. De halveringstijd van een niet gebonden neutron is ongeveer 10 minuten. Het overschot aan massa wordt omgezet in kinetische energie van het proton en het elektron én in de energie van het anti-neutrino.

Uit metingen blijkt dat de kinetische energie van het proton en het elektron samen minder is dan 0,79 MeV, en vandaar dat Wolfgang Pauli (Oostenrijk, 1900–1958) in 1930 het idee krijgt dat er nóg een deeltje bij betrokken is. Enrico Fermi (Italië, 1901–1954) doet verder onderzoek aan het  $\beta^-$ -verval verzint de naam neutrino (klein neutron). Pas in 1956 wordt het neutrino voor het eerst waargenomen.

Bij de omgekeerde reactie:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$  zie je dat er vóór de reactie 0,79 MeV/c<sup>2</sup> minder massa is dan na de reactie. Dit proces kan daarom niet spontaan verlopen. Vandaar dat protonen stabiel zijn, wat maar goed is ook, want anders zou het waterstofatoom en daarmee alle andere atomen die uit waterstof voortkomen niet kunnen bestaan.

## 16.6 Behoud van impuls en van energie

### Behoud van impuls en van energie

In de vorige paragraaf heb je kennigemaakt met de grootte impuls. De impuls is de massa keer de snelheid:  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ . Het pijltje geeft aan dat impuls een vectorgrootte is en dus een grootte én een richting heeft.

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

- $\vec{p}$  is de impuls in kilogram keer meter per second (kg·m/s)
- $m$  is de massa in kilogram (kg)
- $\vec{v}$  is de snelheid in meter per seconde (m/s)

De wet van **behoud van impuls** geeft aan dat bij een botsing de totale impuls niet verandert.

**impuls vóór de botsing = impuls na de botsing**

$$\Sigma \vec{p}_{\text{voor}} = \Sigma \vec{p}_{\text{na}} \rightarrow \Sigma (m \cdot \vec{v})_{\text{voor}} = \Sigma (m \cdot \vec{v})_{\text{na}}$$

De wet van behoud van impuls volgt uit de wetten van Newton. Stel we laten voorwerp A botsen op voorwerp B. Tijdens de botsing oefent A gedurende tijdsinterval  $\Delta t$  kracht  $F$  uit op B waardoor B een snelheid krijgt. Het product  $F \cdot \Delta t$  noemen we de **stoot**. In dit geval krijgt B een stoot van A. De hoeveelheid stoot is gelijk aan de verandering van de impuls van B.

**$F \cdot \Delta t$  is gelijk aan de verandering van de impuls:  $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v} = \Delta \vec{p}$**

#### BEWIJS

- $\text{stoot} = \vec{F} \cdot \Delta t$  en  $\vec{F} = m \cdot \vec{a} \rightarrow \text{stoot} = m \cdot \vec{a} \cdot \Delta t$
- $\Delta \vec{v} = \vec{a} \cdot \Delta t$
- $\text{stoot} = m \cdot (\vec{a} \cdot \Delta t) = m \cdot \Delta \vec{v} = \Delta \vec{p}$

De derde wet van Newton zegt:  $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$  en als A dus een stoot aan B geeft dan geeft B een tegenovergestelde stoot aan A. Omdat de contacttijd  $\Delta t$  voor A en B hetzelfde is geldt:  $\vec{F}_{A \rightarrow B} \cdot \Delta t = -\vec{F}_{B \rightarrow A} \cdot \Delta t \rightarrow \Delta p_A = -\Delta p_B \rightarrow \Delta p_A + \Delta p_B = 0$ . Hieruit volgt dat de totale impuls voor en na de botsing niet verandert.

## VOORBEELD treinstellen

Om twee treinstellen aan elkaar te koppelen botst treinstel A met 2,0 m/s tegen treinstel B. Bij de botsing worden de treinstellen aan elkaar gekoppeld en gaan ze als één geheel verder. Treinstel A heeft een massa van  $40 \cdot 10^3$  kg en treinstel B een massa van  $60 \cdot 10^3$  kg.

### Bereken de snelheid van A en B vlak na de botsing.

- voor de botsing:  $p_A = m_A \cdot v_A = 40 \cdot 10^3 \cdot 2 = 80 \cdot 10^3$  kg·m/s |  $p_B = 0$
- $\Sigma \vec{p}_{\text{voor}} = \Sigma \vec{p}_{\text{na}}$
- $80 \cdot 10^3 = (40 \cdot 10^3 + 60 \cdot 10^3) \cdot \Delta v_{\text{na}}$
- $\Delta v_{\text{na}} = \frac{80 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3} = 0,80$  m/s

Tijdens de botsing wordt er kinetische energie omgezet in warmte.

### Bereken hoeveel procent van de kinetische energie wordt omgezet.

- voor de botsing:  $E_K = \frac{1}{2} m_A \cdot v_A^2 \rightarrow E_K = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 2^2 = 80 \cdot 10^3$  J
- na de botsing:  $E_K = \frac{1}{2} (m_A + m_B) \cdot v_{AB}^2 \rightarrow E_K = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8^2 = 32 \cdot 10^3$  J
- er is  $\frac{80 \cdot 10^3 - 32 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 60\%$  kinetische energie omgezet in warmte

In dit voorbeeld zien we dat er na de botsing minder kinetische energie is dan voor de botsing. Als dit het geval is noemen we de botsing **inelastisch** (niet-elastisch). Als de kinetische energie na de botsing gelijk is aan die voor de botsing is de botsing **elastisch**.

Elastische botsing:  $\Sigma E_{K \text{ voor}} = \Sigma E_{K \text{ na}}$

Inelastische botsing:  $\Sigma E_{K \text{ voor}} > \Sigma E_{K \text{ na}}$

Als twee harde ballen op elkaar botsen wordt er maar weinig kinetische energie omgezet in warmte. De botsing is dan bij benadering elastisch. Een voorbeeld van een elastische botsing is de **Newton slinger**, zie figuur 22. Bij zo'n slinger is het aantal balletjes dat je laat botsen gelijk aan het aantal balletjes dat wordt weggeschoten. Als er alleen behoud van impuls is en je één balletje loslaat is het mogelijk dat er twee balletjes met de helft van de snelheid of drie balletjes met een derde van de snelheid etc. worden weggeschoten. Maar er is ook behoud van kinetische energie, waardoor deze mogelijkheden zijn uitgesloten. Overigens heeft Newton niets te maken met deze slinger. In 1662 toont Christiaan Huygens (Nederland, 1629 –1695) de wet van behoud van impuls aan en concludeert hij dat er "een grootheid recht evenredig met de massa en evenredig met het kwadraat van de snelheid" moet zijn om de "Newton" slinger te kunnen verklaren. Het zal dan nog bijna 200 jaar duren voor kinetische energie volledig is begrepen.

## VOORBEELD "Newton" slinger

We laten één balletje met massa  $m$  botsen met snelheid  $v$ .

Is het mogelijk is dat er  $x$  balletjes met snelheid  $v/x$  wegschieten?

- impulsbehoud:  $p_{\text{voor}} = m \cdot v$  |  $p_{\text{na}} = x \cdot m \cdot \left(\frac{v}{x}\right) = m \cdot v \rightarrow p_{\text{voor}} = p_{\text{na}}$
- $E_K$  behoud:  $E_{K \text{ voor}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$  |  $E_{K \text{ na}} = \frac{1}{2} (x \cdot m) \cdot \left(\frac{v}{x}\right)^2 = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \cdot \left(\frac{1}{x}\right)$
- alleen voor  $x = 1$  geldt  $E_{K \text{ voor}} = E_{K \text{ na}} \rightarrow$  één balletje wordt weggeschoten



**Figuur 22**  
Newton slinger.

## De impuls van een foton

Een foton heeft rustmassa nul, maar daaruit volgt niet dat een foton geen impuls heeft. Voor de impuls van een foton geldt:

$$p_{\text{foton}} = \frac{h}{\lambda}$$

- $p_{\text{foton}}$  is de impuls van een foton (kg·m/s)
- $h$  is de constante van Planck:  $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$  J·s
- $\lambda$  is de golflengte (m)

## BEWIJS

- $E_{\text{foton}} = m \cdot c^2 = h \cdot f$
- $p_{\text{foton}} = m \cdot c = \frac{h \cdot f}{c}$  en  $c = f \cdot \lambda$
- $p_{\text{foton}} = \frac{h}{\lambda}$

## Botsen met hoge snelheid: $v \approx c$

Bij het onderzoek aan elementaire deeltjes worden deeltjes, zoals protonen of elektronen, met grote snelheid op elkaar geschoten. Voor en na de botsing werken er geen krachten op de deeltjes, zodat ze alleen kinetische energie hebben. Omdat elementaire deeltjes geen energie kunnen opslaan hebben we altijd te maken met elastische botsingen, waarbij de kinetische energie én de impuls behouden zijn.

$$\Sigma E_{\text{voor}} = \Sigma E_{\text{na}} \quad \text{en} \quad \Sigma \vec{p}_{\text{voor}} = \Sigma \vec{p}_{\text{na}}$$

Bij een elementair deeltje is de snelheid vaak bijna net zo groot is als de lichtsnelheid, zodat we niet de klassieke uitdrukkingen voor de kinetische energie en impuls mogen gebruiken. Want, zoals we hebben gezien in het hoofdstuk relativiteit, is de massa afhankelijk van de snelheid. We zullen dus formules uit de relativiteitstheorie moeten gebruiken.

In de relativiteitstheorie hebben voorwerpen een rustenergie:  $E_0 = m_0 \cdot c^2$ . Als het voorwerp een snelheid heeft wordt de totale relativistische energie  $E = \gamma \cdot m_0 \cdot c^2$

met  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Voor de relativistische impuls geldt:  $\vec{p} = \gamma \cdot m_0 \cdot \vec{v}$ .

Hieruit volgt  $E^2 - p^2 \cdot c^2 = E_0^2$ . Dit is een belangrijk resultaat, want hoewel E en p afhankelijk zijn van het gekozen referentiestelsel is  $E^2 - p^2 \cdot c^2$  voor iedere waarnemer hetzelfde, namelijk het kwadraat van de rustenergie  $E_0^2 = m_0^2 \cdot c^4$ .

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = E_0^2$$

### BEWIJS

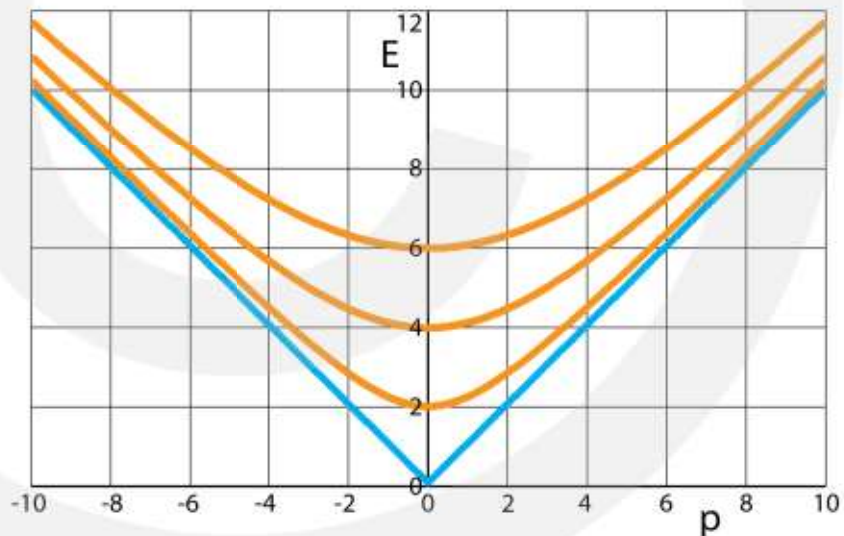
- $E = \gamma \cdot m_0 \cdot c^2 \rightarrow E^2 = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot c^4$
- $p = \gamma \cdot m_0 \cdot v \rightarrow p^2 = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot v^2$
- $p^2 \cdot c^2 = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot v^2 \cdot c^2 \rightarrow p^2 \cdot c^2 = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot c^4 \cdot \frac{v^2}{c^2}$
- $E^2 - p^2 \cdot c^2 = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot c^4 - \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot c^4 \cdot \frac{v^2}{c^2} = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot c^4 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$
- vul in:  $\gamma^2 = \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$
- $E^2 - p^2 \cdot c^2 = \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \cdot m_0^2 \cdot c^4 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = m_0^2 \cdot c^4$
- $E^2 - p^2 \cdot c^2 = E_0^2$

In het hoofdstuk relativiteit hebben we gezien dat  $E - E_0 = E_k$ . Combineren we dit met  $E^2 - p^2 \cdot c^2 = E_0^2$  dan vinden we  $E_k^2 = p^2 \cdot c^2 \rightarrow E_k = p \cdot c$  (positieve waarde). In de "klassieke" natuurkunde geldt:  $E_k = \frac{1}{2}m \cdot v^2$  en  $p = m \cdot v \rightarrow E_k = \frac{p^2}{2m}$ .

$$E_k = p \cdot c \quad \text{relativistisch}$$

$$E_k = \frac{p^2}{2m} \quad \text{klassiek}$$

Het verband tussen E en p is in de relativiteitstheorie duidelijk anders dan in de klassieke natuurkunde. In een (E, p)-diagram is het verschil tussen klassiek en relativistisch goed te zien. In de klassieke natuurkunde is de grafiek een parabool, maar in de relativiteitstheorie vinden we de grafieken van figuur 23. In dit diagram gebruiken we speciale eenheden waarbij  $c = 1$ . Voor onze discussie is dit niet belangrijk.



**Figuur 23**  
Relativistisch (E, p)-diagram.

De oranje grafieken horen bij de rustmassa's 2, 4 en 6 (speciale eenheid). Je ziet dat bij kleine p (lage snelheid) de grafiek parabolisch is, zoals je verwacht. Bij grote p benadert de grafiek een rechte lijn. De richtingscoëfficiënt van de raaklijn aan een (E, p)-grafiek is de snelheid. Bij de oranje grafieken varieert de snelheid van nul tot maximaal c.

De blauwe grafiek hoort bij rustmassa 0. Bij kleine p gedraagt deze grafiek zich heel anders. De grafiek is niet parabolisch, maar altijd een rechte lijn. De snelheid die hieruit volgt is altijd c. Een deeltje met rustmassa nul heeft daarom altijd snelheid c. Gluonen en fotonen (en het graviton) hebben rustmassa 0 en bewegen dus altijd met snelheid c. Het is nog niet duidelijk of neutrino's een rustmassa hebben, maar als blijkt dat ze geen rustmassa hebben volgt daaruit automatisch dat ze met de lichtsnelheid reizen.