

Interactie van kosmische straling en aardatmosfeer

2.1 Elementaire deeltjes

Bij de botsing van een primair kosmisch deeltje met een zuurstof- of stikstofaatom in de aardatmosfeer ontstaan nieuwe deeltjes: pionen, muonen en positronen. Wat zijn dit voor deeltjes? Voor een antwoord op die vraag duiken we in de geschiedenis van het denken over en onderzoek naar de bouwstenen van de materie: de *elementaire deeltjes*.

Atomen – Vanaf het moment dat de Griekse filosofen gaan nadenken over het ontstaan van de Aarde en veranderingen die zij waarnemen, ontstaan de eerste theorieën over de bouw van materie. Filosofen als Empedocles en Aristoteles menen dat alles is opgebouwd uit de elementen aarde, water, lucht en vuur. Leucippus en later Democritus stellen dat alle materie is opgebouwd uit ondeelbare deeltjes die zij 'atomen' noemen – het Griekse *atomos* betekent 'ondeelbaar'. Vele eeuwen later onderzoekt Robert Boyle de volumeverandering van gassen onder druk. Hij constateert dat het volume van een gas omgekeerd evenredig is met de druk (de wet van Boyle). Hij beseft dat een gas moet bestaan uit afzonderlijke deeltjes die in leegte in beweging zijn. Als de druk wordt verhoogd, worden die deeltjes dichter op elkaar gedrukt. In de eerste eeuw voor Christus was de Griekse filosoof Hero van Alexandrië tot dezelfde conclusie gekomen. Later bouwt Boyle zijn theorie verder uit en stelt dat de uit deeltjes bestaande elementen – en dat zijn inmiddels andere dan aarde, water, lucht en vuur uit de Griekse oudheid – zich kunnen verenigen in groepen of clusters (verbindingen). Dit is het begin van het molecuulconcept. Dit concept wordt verder uitgewerkt door John Dalton. Na de ontdekking dat elke verbinding is opgebouwd uit elementen die in eenvoudige vaste verhoudingen met elkaar reageren (zoals bijvoorbeeld 1:3), stelt Dalton dat alle elementen uit minuscule onafbreekbare atomen bestaan. De verbindingen zijn dan eenvoudige combinaties van deze atomen.

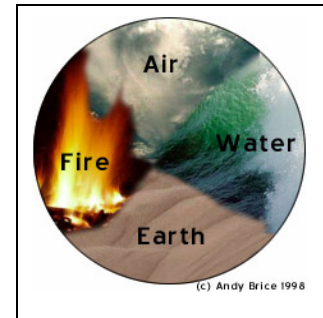
Het ondeelbare atoom lijkt nu het kleinste deeltje te zijn. Maar in 1890 ontdekt Joseph Thomson het elektron. Omdat het elektron uit het atoom afkomstig is, moet het atoom wel deelbaar zijn. Rond 1900 werd het atoom dan ook voorgesteld als een zachte, positief geladen bal met daarin negatief geladen elektronen. Later blijkt uit botsingsexperimenten van Ernest Rutherford dat het atoom bestaat uit een zeer kleine positief geladen kern met daaromheen een ijle elektronenwolk. Ook deze kern blijkt deelbaar te zijn: in de jaren 20 en 30 van de vorige eeuw worden het positief geladen proton (p^+) en het ongeladen neutron (n^0) ontdekt als bouwstenen van de atoomkern. Samen met het elektron worden zij beschouwd als de elementaire deeltjes.

Naast het neutron, proton en elektron ontdekt men in de eerste helft van de vorige eeuw nog een aantal andere deeltjes, zoals het positron (een positief elektron), het neutrino en het foton. In de jaren daarna volgen nog meer 'elementaire' deeltjes uit het onderzoek aan botsingen in steeds grotere deeltjesversnellers.

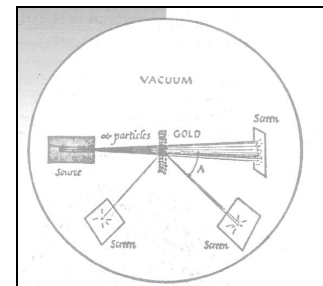
Een meer uitgebreide beschrijving van het denken over en onderzoek naar de bouw van materie is onder andere te vinden in:

- > Kortland, J. e.a. (2004), *Newton – Natuurkunde voor de tweede fase, VWO informatieboek 1b* (hoofdstuk 13: Materie – Deeltjestheorie en straling). Zutphen: Thieme-Meulenhoff.

Deeltjes en krachten – Voorwerpen, en dus ook deeltjes als atomen, protonen, neutronen en elektronen, oefenen krachten op elkaar uit. Dit kunnen aantrekkende en afstotende krachten zijn.

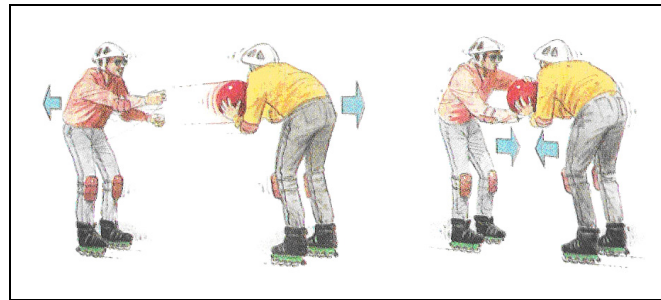


Figuur 1 – De vier elementen uit de Griekse oudheid.



Figuur 2 – Het botsingsexperiment van Rutherford.

Er zijn vier fundamentele krachten: de sterke kernkracht, de elektromagnetische kracht, de zwakke kernkracht en de gravitatiekracht (ook wel bekend als de zwaartekracht). Deze krachten werken op afstand. Fysici stellen zich voor dat voorwerpen krachten op elkaar uitoefenen door het uitwisselen van deeltjes.



Figuur 3 – Het uitoefenen van een kracht door uitwisseling van deeltjes kun je vergelijken met twee schaatsers die een (zware) bal heen en weer gooien. Hierdoor oefenen zij een afstotende kracht op elkaar uit. Als zij beiden aan deze bal trekken, oefenen ze een aantrekkende kracht op elkaar uit.

De eerste die met dit idee komt is Yukawa, die in 1935 voorspelt dat er een deeltje moet zijn dat verantwoordelijk is voor de sterke kernkracht: de kracht tussen protonen en neutronen in de atoomkern. Hij voorspelt dat de massa van dit deeltje tussen de massa van een elektron en een proton in moet liggen. Daarom wordt het deeltje een *meson* (betekenis: 'in het midden') genoemd. In kosmische straling wordt een deeltje ontdekt dat ongeveer de voorspelde massa heeft. Dit deeltje (later muon genoemd) blijkt echter geen interactie te vertonen met materie en kan daarom niet het gezochte deeltje zijn. In 1947 wordt het deeltje gevonden. Het wordt *pi meson* (afgekort: *pion*) genoemd. Het deeltje blijkt drie mogelijke ladingen te hebben: $+e$, $-e$ en 0 . De pionen worden daarom ook aangeduid als π^+ , π^- en π^0 . Na 1970 blijkt dat niet mesonen maar zogenaamde *gluonen* verantwoordelijk zijn voor de sterke kernkracht.

Op een soortgelijke manier worden ook de andere krachten overgebracht door deeltjes. We noemen deze deeltjes *wisselwerkingsdeeltjes*. De tabel van figuur 4 geeft een samenvatting van de fundamentele krachten en de bijbehorende wisselwerkingsdeeltjes.

kracht	omschrijving	relatieve sterkte	wisselwerkingsdeeltje
sterke kernkracht	kracht tussen protonen en neutronen in de atoomkern	100	gluon
elektromagnetische kracht	kracht tussen ladingen (elektriciteit en magnetisme)	1	foton
zwakke kernkracht	speelt een rol bij bepaalde typen radioactief verval	10^{-11}	W^\pm en Z^0
gravitatiekracht (zwaartekracht)	kracht tussen massa's	10^{-36}	graviton (nog niet ontdekt)

Figuur 4 – Fundamentele krachten en wisselwerkingsdeeltjes.

- In de tabel van figuur 4 is te zien dat van de vier fundamentele krachten de gravitatiekracht veruit de zwakste is.
 - Toon dit aan door de gravitatiekracht en de elektrische kracht die bijvoorbeeld twee elektronen of een elektron en een proton op elkaar uitoefenen met elkaar te vergelijken.
 - Verklaar waarom de invloed van die gravitatiekracht zich toch tot op zeer grote afstanden uitstrekt.

Deeltjes en antideeltjes – In 1932 ontdekt men een deeltje met dezelfde eigenschappen als het elektron, maar met een positieve lading. Dit deeltje krijgt de naam *positron*. Het is het antideeltje van het elektron. Een positron en een elektron kunnen ontstaan uit een foton met een voldoende hoge energie. Dit proces noemen we *creatie* of *paarvorming*. De energie E van het foton wordt daarbij omgezet in de gezamenlijke massa m van de twee deeltjes volgens de bekende formule van Einstein: $E = m \cdot c^2$.

Later komen er nog meer antideeltjes bij, zoals het negatief geladen antiproton en het antineutron. Wanneer een deeltje botst met zijn antideeltje worden zij beiden vernietigd en wordt hun gezamenlijke massa m omgezet in energie. Dit proces noemen we *annihilatie*. De energie komt vrij in de vorm van een tweetal fotonen. De gezamenlijke energie E van deze fotonen wordt weer gegeven door $E = m \cdot c^2$.

Classificatie van deeltjes – De vele deeltjes die in de loop van de tijd worden ontdekt in botsingsexperimenten met deeltjesversnellers zijn in te delen in een drietal categorieën: *bosonen*, *leptonen* en *hadronen*. De hadronen worden weer onderverdeeld in *mesonen* en *baryonen*. De tabel van figuur 5 geeft een overzicht van de deeltjes in deze categorieën.

categorie	deeltjes
bosonen	foton, W- en Z-deeltjes
leptonen	elektron, e-neutrino, muon, μ -neutrino, tau, τ -neutrino
hadronen: mesonen	onder andere het pion
hadronen: baryonen	onder andere het proton en neutron

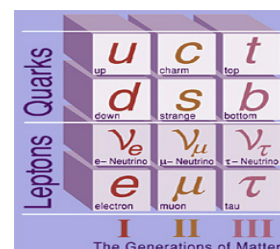
Figuur 5 – Deeltjescategorieën.

Volgens fysici zijn leptonen elementaire deeltjes. Dat wil zeggen: ze zijn niet op te delen in kleinere deeltjes en hun afmetingen zijn dusdanig klein dat deze niet meetbaar zijn (kleiner dan 10^{-18} m). Omdat er meer dan honderd hadronen blijken te zijn, komen Murray Gell-Mann en George Zweig in 1962 met de veronderstelling dat hadronen moeten zijn opgebouwd uit elementaire deeltjes: de *quarks* – een naam die afkomstig is uit de roman *Finnegan's Wake* van James Joyce: 'Three quarks for Muster Mark!' Quarks en leptonen worden nu beschouwd als de elementaire deeltjes. Evenals elektronen zijn quarks in elk geval kleiner dan 10^{-18} m, en zouden zelfs beschouwd kunnen worden als punten (zonder afmetingen). De baryonen bestaan uit drie quarks, de mesonen bestaan uit een quark en een antiquark.

Quarks – Er zijn tot nu toe zes quarks ontdekt. Zij komen voor in paren: up en down, charm en strange, top en bottom. De tabel hieronder geeft een overzicht, waarin te zien is dat de quarks een fractionele lading hebben. Dat wil zeggen: een lading kleiner dan de elementaire lading e van het elektron.

naam	symbool	lading
up	u	$+\frac{2}{3}e$
down	d	$-\frac{1}{3}e$
charm	c	$+\frac{2}{3}e$
strange	s	$-\frac{1}{3}e$
top	t	$+\frac{2}{3}e$
bottom	b	$-\frac{1}{3}e$

Figuur 6 – De zes quarks met hun symbool en fractionele elementaire lading.



Figuur 7 – De drie generaties elementaire deeltjes.

De quarks en leptonen worden onderverdeeld in drie groepen of 'generaties' zoals weergegeven in figuur 7. De eerste generatie bevat onder andere het up- en het downquark en het elektron. Deze deeltjes zijn stabiel: alle zichtbare materie is opgebouwd uit deeltjes van deze eerste generatie. De deeltjes in de tweede en derde generatie zijn zwaarder dan die uit de eerste generatie en zijn niet stabiel. Ze vervallen uiteindelijk tot deeltjes van de eerste generatie. Het is niet uit te sluiten dat er nog meer generaties ontdekt zullen worden. Naast quarks zijn er ook antiquarks. De lading van een antiquark is tegengesteld aan de lading van de quark. Zo heeft de anti-upquark (\bar{u}) $-\frac{2}{3}e$ als lading. De baryonen zijn opgebouwd uit drie quarks. Zo bestaat een proton uit twee upquarks en een downquark (uud) en een neutron uit een upquark en twee downquarks (udd). De zwaardere (en minder stabiele) baryonen bestaan uit combinaties van strange- en charmquarks of bottom- en topquarks. Mesonen bestaan uit twee quarks: een quark en een antiquark. Zo bestaat het pion (π^+) uit een upquark en een anti-downquark ($u\bar{d}$). Bij het antideeltje van een meson zijn quark en antiquark omgewisseld. Het antipion (π^-) bestaat dus uit een anti-upquark en een downquark ($\bar{u}d$). Het ongeladen pion (π^0) is een soort mengsel van $u\bar{u}$ en $d\bar{d}$. Omdat mesonen bestaan uit een combinatie van een deeltje met een antideeltje zijn zij zeer instabiel. Van de mesonen is π^0 het meest onstabiel.

- 2 Ga met behulp van de lading van de quarks na wat de lading is van het proton, het neutron en de drie pionen.

Al sinds Einstein zijn fysici op zoek naar een theorie die de vier fundamentele krachten verenigt. Tot nu toe is men er in geslaagd de zwakke kernkracht en de elektromagnetische kracht in één theorie te verenigen. Deze theorie wordt aangeduid als het 'standaardmodel'. Dit model omvat dus de zes quarks en de zes leptonen (welke samen de massa van materie bepalen) en de wisselwerkingsdeeltjes die de krachten overbrengen, zoals het foton.

Proton-proton botsingen – Wat gebeurt er nu als een hoog-energetisch primair kosmisch deeltje op de kern van een zuurstof- of stikstofatoom in de aardatmosfeer botst? Een dergelijke botsing kunnen we opvatten als een botsing tussen twee protonen. Wanneer het inslaande proton voldoende energie heeft, kan (een deel van) die energie worden omgezet in materie in de vorm van een quark-antiquark paar – vergelijk de creatie van een elektron-positron paar uit een hoogenergetisch foton. Bij een hoogenergetische proton-proton botsing zijn er twee mogelijkheden:

- er ontstaat een neutraal pion (π^0): $p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + \pi^0$
- er ontstaat een positief geladen pion (π^+) en een neutron (n^0): $p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + n^0 + \pi^+$

3 Ga voor elk van de twee mogelijke processen na welke quark-antiquark paren er worden gevormd en hoe de bij het proces betrokken quarks zich eventueel hergroeperen.

Het neutrale pion (π^0) heeft een zeer korte levensduur van $0,84 \cdot 10^{-16}$ s en vervalt tot gammafotonen. De quarks in het pion worden hierbij dus omgezet in energie.

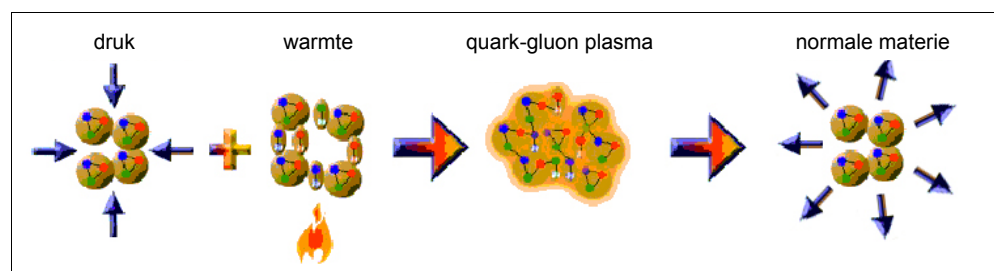
Het positief geladen pion (π^+) is met een levensduur van $2,60 \cdot 10^{-8}$ s iets stabielere. Dit pion vervalt tot een muon (instabiel) en een neutrino (stabiel). Het muon vervalt op zijn beurt tot een elektron (stabiel) en twee neutrino's.

Meer informatie over elementaire deeltjes en wisselwerkingen is te vinden in het lesmateriaal van het *Project Moderne Natuurkunde*, Universiteit Utrecht:

> <http://www.phys.uu.nl/~wwwpmn> > Reacties

Quark-gluon plasma – De hoogenergetische deeltjes die vanuit de kosmos op de buitenste lagen van de aardatmosfeer inslaan kunnen zo heftig met atomen botsen dat er een nieuw soort faseovergang van de materie optreedt: er ontstaat een *quark-gluon plasma*. Quarks zijn de bouwstenen van de protonen en neutronen in de atoomkern. Zowel het proton als het neutron bestaat uit drie quarks die bij elkaar worden gehouden door gluonen. Deze gluonen veroorzaken daarmee ook de aantrekkende kracht tussen de protonen en neutronen waardoor de atoomkern niet uit elkaar valt.

Bij de vorming van een quark-gluon plasma is sprake van de in figuur 8 weergegeven faseovergang van materie vanuit een toestand van protonen en neutronen (met ieder drie quarks) en gluonen naar een toestand waarin quarks en gluonen vrij kunnen bewegen – vandaar de naam quark-gluon plasma. Een dergelijke faseovergang treedt op als materie onder grote druk staat en een heel hoge temperatuur heeft.



Figuur 8 – Schematische weergave van de vorming van een quark-gluon plasma, gevolgd door de terugkeer naar de toestand van normale materie.

Kosmische straling bestaat voornamelijk uit protonen, en in de bovenste luchtlagen van de aardatmosfeer bevinden zich voornamelijk stikstofatomen. Hoogenergetische botsingen tussen deze twee zullen waarschijnlijk geen quark-gluon plasma creëren. Dit komt doordat het proton alleen interactie aangaat met één proton of neutron in het stikstofatoom. Voor de vorming van een quark-gluon plasma moeten grotere aantallen protonen en/of neutronen bij de botsing betrokken zijn. Dat is – onder bepaalde voorwaarden – het geval bij een zeer hoogenergetische botsing tussen een zwaarder kosmisch deeltje, bijvoorbeeld een ijzerkern, en de kern van een stikstofatoom. Deze kosmische straling komt echter weinig voor: maximaal 1 deeltje per m^2 per jaar. Een voorwaarde is bovendien dat het gaat om een

frontale en inelastische botsing, omdat alleen dan een voldoende groot aantal protonen en/of neutronen interactie aangaan om de hoge energiedichtheid van zo'n $1,5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ te verkrijgen. De minimale (kritische) temperatuur die nodig is voor het quark-gluon plasma is 120 MeV – meer dan 10^{11} K . De interne druk van het plasma is zo'n $3 \cdot 10^{33} \text{ N}/\text{cm}^2$ – het gewicht van ruim dertig zonnen op één vierkante centimeter!

Door de enorme lokale hitte en druk dijt het plasma uit met ongeveer de helft van de lichtsnelheid. Hierdoor zullen de temperatuur en de druk afnemen, totdat het plasma weer overgaat naar de toestand van protonen en neutronen.

Studies naar het quark-gluon plasma zijn van belang voor een beter natuurkundig begrip van de wereld waarin wij leven. Bij de Big Bang heeft deze vorm van materie zeer kort bestaan voordat de huidige materie werd gevormd. Voor de kosmologie is deze studie van belang doordat verwacht wordt dat deze vorm van materie voorkomt in de kernen van neutronen- en quarksterren.