

Deeltjes

Terug naar de (atoom)deeltjes. We kennen er al heel wat, maar er zijn zovéél deeltjes, het duizelt! Alles op deze wereld, in het heelal, alles bestaat uit deeltjes, dat wisten de oude Grieken al. Een zekere Democritus beweerde een paar duizend jaar geleden al dat alles uit “atomen” (atomos = ondeelbaar) bestond. In de 19^e eeuw kwam men er achter dat dit nog niet zo’n gek idee was. Men ontdekte dat alle stoffen uit kleine deeltjes: “moleculen”, bestonden, die op hun beurt ook weer uit nog kleinere deeltjes bestaan: “atomen”! Later bleek dat deze atomen toch niet ondeelbaar waren en ook weer uit deeltjes bestonden en... die ook weer enz. enz? Het zou kunnen, precies weten doet men het niet! Men kent tegenwoordig al zo’n 200 verschillende deeltjes en men zoekt nog steeds naar nog meer deeltjes!

Eerst maar weer het atoom: een atoom bestaat uit een kern waarom elektronen cirkelen: de elektronenwolk. Zoals we weten bestaat de kern uit twee verschillende deeltjes: “protonen” en “neutronen”. Lange tijd was dat ‘t. Lekker simpel en alles leek duidelijk. Maar.....met de komst van “versnellers” en “cyclotrons”, ontdekte men steeds meer nieuwe deeltjes. Eerst maar eens de “quarks”, waaruit de protonen en neutronen opgebouwd zijn!

Quarks

Een vreemde naam voor een stel vreemde deeltjes! De naam “quark” komt uit één of ander boek, nl: “Finnegans wake” van James Joyce, maar verder is het zomaar een naam! Wat zijn quarks? Men beschouwt de quarks als elementair-deeltjes, maar of dit echt waar is? Dat dacht men ook van protonen en neutronen, maar door proeven in de eerder genoemde versnellers kwam men tot de ontdekking dat protonen en neutronen niet elementair waren maar ook weer uit deeltjes bestonden. In versnellers laat men deeltjes met hoge snelheid op elkaar botsen en tracht zo meer te weten te komen over de materie. Men ontdekt vooral steeds meer nieuwe deeltjes met een zéér korte levensduur.

Intussen heeft men op die manier 6 quarks ontdekt, maar er bestaan ook “anti-quarks en dan komt men dus op 12 verschillende quarks. Daar men nog lang niet alles van quarks begrijpt heeft men ze enigszins vreemde namen gegeven. Hier volgen ze:

- Up quark (u) Down quark (d) Up anti-quark(\bar{u}) Down anti-quark (\bar{d})
- Charm quark (c) Strange quark (s) Charm anti-quark(\bar{c}) Strange anti-quark(\bar{s})
- Top quark (t) Bottom quark (b) Top anti-quark (\bar{t}) Bottom anti-quark (\bar{b})

Deze quarks heeft men tot nu toe alleen in groepjes van 3 aangetroffen (maar heel soms ook in groepjes van 4 en 5). Een “losse” quark is nog nooit aangetroffen. Ze blijken ook lading te bezitten. Hierbij kwam men in moeilijkheden omdat de elementaire lading (+ of -) 1 is, maar dat heeft men op weten te lossen. Als we er vanuit gaan dat elektronen lading -1 , protonen $+1$ en neutronen lading 0 hebben, dan is men tot de volgende conclusie gekomen:

- Up-, charm- en topquark hebben: lading $+ 2/3$
- Down-, strange- en bottomquark hebben: lading $- 1/3$

Men denkt nu dat de protonen en neutronen uit up en down quarks bestaan en wel op de volgende wijze:

Een proton bestaat uit 2 upquarks en 1 downquark: **uud** met lading $+2/3 +2/3 -1/3 = +1$.

Een neutron bestaat uit 1 upquark en 2 downquark: **udd** met lading $+2/3 -1/3 -1/3 = 0$

Ter onderscheiding heeft men quarks ook nog maar een kleur gegeven, geen echte natuurlijk, maar voor 't gemak. Die kleuren zijn: rood, blauw en groen! Daar 3 quarks een proton of neutron vormen hebben deze dan de kleur wit, want zo'n kerndeeltje moeten uit 3 verschillende quarks bestaan. Er zijn ook anti-quarks en die tegenhangers "hebben" dan de complementaire kleuren: magenta, geel en cyaan! (samen zwart?)

Maar die andere quarks (dus niet de up- en downquarks) wat doen die? Nou, die vormen een bepaalde soort kortlevende deeltjes. Volgens de geleerden bestaan er (heel kort) allerlei zogenaamde "virtuele" deeltjes. Sommige bestaan dan uit een bepaald soort quark en anti-quark. Als ze ontstaan (hoe en waarom weet volgens mij nog niemand) annihilieren ze elkaar bijna direct weer, vandaar hun zeer korte levensduur. Die bedraagt zo'n 10^{-22} seconde.

Als je nadenkt over deze ongelofelijk korte levensduur, dan is er toch iets vreemds aan de hand. c , de lichtsnelheid, bedraagt 3×10^8 meter per seconde. Zou zo'n virtueel deeltje zich nu met snelheid c bewegen, dan is de afgelegde weg in z'n kortstondig leven:

$$S = V \times t = (3 \times 10^8) \times 10^{-22} \text{ meter} = 3 \times 10^{-14} \text{ meter.}$$

Dat is wel een héél kort spoortje, zelfs niet in nanometer (10^{-9} meter) aan te geven, we zitten dan in het "femtometer" gebied! "Jongens, bestaan die deeltjes wel echt?" vraagt deze "sceptische ongeleerde" zich af!

Deeljeschaos

We gaan verder. Er zijn tot nu echter al zoveel deeltjes genoemd, zou het niet leuk zijn als er wat meer orde in kwam? Maar hoe? Als geprobeerd wordt ze te ordenen en in categorieën te verdelen, komt men in een wirwar van verzamelingen, namen, onderverdelingen, om gek van te worden. Hoe kan hierin nu orde gebracht worden? Dat blijkt zeker niet eenvoudig, er zijn vele manieren!

Eerst leek het redelijk eenvoudig: een atoom heeft een kern van protonen en (behalve waterstof) neutronen, met daar omheen een "wolk" van elektronen. En de protonen en neutronen bestaan dus uit "quarks". Maar toen..... Met steeds grotere deeltjesversnellers ontdekte men een vloed van nieuwe deeltjes, waardoor er haast geen touw meer aan vast te knopen is. Door deeltjes met steeds hogere snelheid te laten botsen met andere deeltjes, vindt men steeds nieuwe deeltjes, steeds meer soorten met steeds meer namen.

Toch wil men meer van de materie weten en men blijft dus doorgaan met botsen en het bestuderen van de resultaten van deze botsingen. Zijn die nieuwe deeltjes dan zo belangwekkend? Men vindt van wel, maar ik heb mijn bedenkingen. Er is namelijk één gegeven: al die nieuwe deeltjes zijn onstabiel en hebben een ongelofelijk korte levensduur, ze bestaan slechts minieme fracties van een seconde! Maar....., door hun enorme snelheid weten ze toch een spoor te trekken, waar men dan van alles uit concludeert.

Eigenlijk zijn de enige écht stabiele deeltjes de **elektronen** en de **protonen**. **Neutronen** zijn ook stabiel, maar alleen **als ze gebonden zijn aan protonen**. En, dan zijn er ook nog **neutrino's**, die ook stabiel lijken. Stabiel wil dus zeggen dat ze miljarden jaren kunnen bestaan. Op den duur zullen echter ook deze stabiele deeltjes vervallen tot..... energie, maar dan moeten we wel nog een paar biljoen nachtjes slapen!

De quarks, waaruit protonen en neutronen bestaan, zijn ook stabiel, maar waarschijnlijk alléén als ze met z'n drieën zijn en zo een kerndeeltje vormen. Een losse quark is (tot nu toe) nog nooit aangetoond, wel 4 en zelfs 5 samen ("pentaquarks"). Waarom die quarks altijd met minimaal drie samen moeten zijn? Daar heeft "men", en ik helaas ook, nog geen idee over!

En de neutronen? Als die uit de kern gestoten worden (of vrijwillig vertrekken), dan is het snel met ze gebeurd. Ze bestaan dan nog slechts een minuut of vijftien en vervallen dan tot een proton en een elektron.

Verder zijn er dan nog allerlei “krachtvoerende” of “wisselwerkende” deeltjes, welke de 4 natuurkrachten (of wisselwerkingen) zouden overbrengen. Deze 4 krachten (al eerder genoemd) zijn dus: de sterke en zwakke kernkracht, de elektromagnetische en de zwaartekracht. Sommige van deze wisselwerkende deeltjes (de “gravitonen” van de zwaartekracht) bestaan alleen theoretisch, het bestaan ervan is nog niet eens aangetoond!

Om het geheel nog ingewikkelder te maken heeft ieder deeltje ook nog z'n “anti”deeltje. Er zijn dus antiprotonen, anti-elektronen en anti-neutrino's enzovoort. Overigens noemt men een anti-elektron meestal een “positron” of soms ook “positon”.

Om enige orde in de veelheid van deeltjes te brengen moeten we ze maar eens in categorieën verdelen.

Subatomaire deeltjes

Hier volgen enige pogingen om de subatomaire deeltjes te ordenen.

EERSTE MANIER:

Een goede manier? Dit is de manier van de Encarta “encyclopie”! Alle deeltjes worden ondergebracht in vier categorieën:

- **Baryonen** (“zware deeltjes”)
- **Mesonen** (“middendeeltjes”)
- **Leptonen** (“lichte deeltjes”)
- **Wisselwerking-deeltjes** (krachtvoerende of “ijk”deeltjes)

-BARYONEN.

Hieronder vallen de kerndeeltjes of “nucleonen” (nucleus = kern).

Dat zijn dus de protonen, neutronen, maar ook de quarks waaruit deze kerndeeltjes opgebouwd zijn. Al deze deeltjes hebben te maken met de sterke kernkracht, die de atoomkern bij elkaar houdt.

-MESONEN

Dit zijn “virtuele” deeltjes, bestaande uit een quark en een anti-quark (néé spellingscorrectie, ik bedoel niet: antiquair!) Daar deze deeltjes elkaar “annihileren” is het snel met ze gedaan.

Er zouden 15 soorten mesonen zijn, te weten de “pionen”, “kaonen”, maar verder?

Het zijn deeltjes met een zeer korte levensduur en ook de mesonen worden beïnvloed door de sterke kernkracht. Zij ontstaan spontaan en verdwijnen weer even snel.

-LEPTONEN

De bekendste leptonen zijn de elektronen. (Ook hun antideeltjes de positronen zijn vanzelfsprekend leptonen.) Verder hebben we dan nog de neutrino's (drie soorten), de muonen (meerdere soorten) en de “tau”-deeltjes, die allen tot de leptonen behoren.

Leptonen worden **niet** door de sterke kernkracht beïnvloed.

-WISSELWERKINGSDEELTJES

Deze worden ook “krachtvoerende” of “ijk”deeltjes genoemd.

Daar er vier natuurkrachten zijn hebben we dus vier soorten:

- “Gluonen”, “lijm”deeltjes die de quarks aan elkaar “lijmen”. Zij “voeren” de sterke kernkracht.

- “Vector bosonen”, kortlevende deeltjes in 3 soorten: het W⁺ en het W⁻-deeltje en het Z-deeltje. Zij spelen een (kortstondige) rol bij radioactief verval en zouden de wisselwerking(s)deeltjes van de zwakke kernkracht zijn. Vreemd is dat deze deeltjes vrij veel massa bezitten.
- “Fotonen”, massaloze energiepakketjes die met lichtsnelheid rondreizen en als deeltje/golf de elektromagnetische straling vormen. Fotonen zouden dus de elektromagnetische kracht moeten “voeren”. Deze deeltjes hebben dus geen (rust)massa!
- “Gravitonen”, hypothetische deeltjes die de zwaartekracht zouden overdragen. Ze zijn nog nooit waargenomen. Bestaan ze wel echt?

Dit lijkt een aardige manier, maar is toch niet erg duidelijk. En... helaas blijkt ook dat we niet alles te pakken hebben. Wat zijn “Fermionen”? “Hadronen”? “Higgs Bosonen”? Een andere manier dan maar:

TWEEDE MANIER

Die andere manier is dan de verdeling in “**fermionen**” en “**bosonen**”.

- De **fermionen** zijn de deeltjes die de “materie” vormen.

Dit zijn dus de al genoemde protonen, neutronen, neutrino’s maar ook quarks en elektronen (en positronen) behoren hiertoe. Wat “materie” precies is blijkt niemand te weten, maar toch kunnen we materiedeeltjes nog wel enigszins voorstellen, ook al omdat ze “massa” en “levensduur” hebben..

- De **bosonen** zijn de “krachtvoerende” deeltjes.

Deze deeltjes zijn eigenlijk niet voor te stellen want hoe brengen die zogenaamde “krachtvoerende” deeltjes nu een kracht over? Omdat dit blijkbaar niet alleen door mij, maar door niemand goed begrepen wordt, noemt men deze deeltjes dus ook maar:

“wisselwerkingsdeeltjes” of “ijkdeeltjes”, wat de zaak trouwens niet begrijpelijker maakt.

Een kracht is toch heel wat anders dan een wisselwerking? In de atoomfysica dus niet!

Tot de bosonen behoren dus de “fotonen”, “gravitonen”, “gluonen” en de “W” en “Z” deeltjes. Maar ook de “pionen”, de “mesonen”, deeltjes die dus (zeer kort) bestaan uit een quark en een anti-quark. En het nog niet ontdekte “Higgs boson”.

Nóg een keertje (uit een andere bron van ‘t internet):

FERMIONEN

De fermionen of “materiedeeltjes” kunnen we ook weer onderverdelen, en die ook weer.....

Fermionen bestaan uit: LEPTONEN en HADRONEN.

- Leptonen: dit zijn letterlijk “lichte deeltjes” (hoewel dit niet altijd zo is!). Tot de leptonen behoren: elektronen, positronen, muonen, tauonen en neutrino’s.
- Hadronen: dit zijn letterlijk “volgroeide deeltjes”. De hadronen bestaan op zich weer uit baryonen, “zware deeltjes” en mesonen, “middendeeltjes”. De mesonen behoren echter tot de bosonen daar dit geen materiedeeltjes zijn. (Snappen jullie het nog?)
 - Baryonen. Hiertoe behoren de kerndeeltjes (ook nucleonen of nucleïden genoemd, nucleus = kern): protonen en neutronen. Deze kerndeeltjes bestaan op hun beurt weer uit “quarks” (altijd drie). Quarks ziet men thans als elementaire deeltjes (maar al eerder was men mis!)
 - Mesonen. Dit zijn dus geen fermionen (materiedeeltjes), maar ze behoren wel tot de hadronen! Hoe kan dit nou toch weer? Dit is dus enigszins fout gelopen!

BOSONEN

De bosonen bestaan uit “MESONEN” en de “WISSELWERKENDE”, “KRACHTVOERENDE” of “IJK” deeltjes.

- Mesonen. Dit zijn dus instabiele, kortlevende, “virtuele” deeltjes bestaande uit een quark en anti-quark. Er zouden 15 verschillende soorten zijn. Ze behoren tot de hadronen maar omdat het geen materiedeeltjes zijn rekent men ze toch tot de bosonen (lekker duidelijk). Men kent o.a. de volgende mesonen:
 - Pi-mesonen of pionen
 - Mu-mesonen of muonen
 - Kaon
 - Eta
- De mesonen ontstaan bij botsingen in versnellers en spelen een (voor mij) onduidelijke rol in de atoomkern. Ze zouden “gluonen uitwisselen!”
- Krachtvoerende deeltjes: dit zijn dus de deeltjes die de 4 natuurkrachten (of wisselwerkingen) over zouden brengen. Men kent thans de volgende soorten:
 - Fotonen, deze zouden de elektromagnetische kracht over brengen.
 - Gluonen, “lijmdeeltjes”, zij “voeren” de sterke kernkracht.
 - W- en Z-bosonen, deze “voeren” de zwakke kernkracht.
 - Gravitonen, men denkt dat zij de zwaartekracht overbrengen, zoals gezegd, hun bestaan is nog nooit bewezen.
- Er is verder nóg een hypothetisch boson nl. het “Higgs boson”. Ook dit is (nog) nooit aangetoond. Dit (deze) Higgs boson zou veel verklaren, denkt men, onder andere het begrip “massa”. Mijnheer Higgs en vele anderen denken dat dit deeltje vast en zeker bestaat. We wachten af, het is 2007, het jaar dat de “Large Hadron Collider” (de grote hadronenbotser) in CERN Genève in bedrijf komt.

Nog één keer wat over de heelalkrachten of wisselwerkingen, er zijn er vier.

- **Sterke kernkracht:**

Deze houdt de atoomkern bij elkaar en heeft een zéér kort bereik. Werkt op protonen en neutronen en quarks en wordt “gevoerd” door de gluonen. Het vreemde van de sterke kracht is dat deze toeneemt met de afstand en dan plotseling verdwijnt. Het is dus een soort elastiek dat eerst sterker trekt en dan breekt!

Zeer korte reikwijdte: $1/r^7$. Bij toenemende afstand zou deze kracht dus met de zevende macht afnemen, maar in het begin neemt hij heel even toe! Kracht: $10^{39} - 10^{40} \times$ zwaartekracht.

- **Zwakke kernkracht:**

Speelt een rol bij radioactiviteit, heeft ook een erg kort bereik en neemt kwadratisch af. Zou “gevoerd worden door de (virtuele) W^+ , W^- en de Z-deeltjes.

Hoe deze kracht precies werkt begrijp ik niet (en ik ben bang niemand) maar ze zorgt er wel voor dat atoomkernen uiteindelijk stabiel worden en wij dus bestaan!

Reikwijdte: $1/r^5 - 1/r^7$. Kracht: $10^{24} - 10^{25} \times$ zwaartekracht.

- **Elektromagnetische kracht:**

Deze houdt atomen en moleculen bij elkaar, speelt een hoofdrol bij chemische processen en heeft een oneindig groot bereik. Fotonen zijn hierbij de wisselwerkingsdeeltjes.

Reikwijdte: $1/r^2$. Kracht: $10^{19} - 10^{20} \times$ de zwaartekracht.

Opmerking: de zwakke en de elektromagnetische kracht ziet men thans ook vaak als twee vormen van één kracht: de elektrozwakke kracht”.

- **Zwaartekracht:**

Speelt op atomair niveau eigenlijk geen rol, maar des te meer bij grote massa's en houdt zo planeten, sterren en sterrenstelsels bij elkaar. Deze kracht heeft theoretisch eveneens een oneindig bereik maar door de kwadratische afname, praktisch zeker niet. Toch is deze kracht van enorme invloed op grote massa's, doordat deze kracht optelt.

Het zwaartekracht voerende deeltje zou het (nog nooit waargenomen) “graviton” zijn.

Reikwijdte: $1/r^2$. Kracht: 10^{-40} x de sterke kernkracht.

We zien uit bovenstaande dat de sterke en zwakke kernkrachten zeer snel afnemen, zeg maar met de zevende macht. Ze hebben daardoor slechts op zeer korte afstand effect. De elektromagnetische en zwaartekracht nemen met het kwadraat van de afstand af en reiken in principe oneindig ver. We zien ook dat de sterke kernkracht 10^{40} (1 met 40 nullen!) keer sterker is dan de zwaartekracht!

Uiteindelijk verhouden deze krachten zich ongeveer als volgt:

Sterke kernkracht : Elektromagn. Kracht : Zwakke kernkracht : Zwaartekracht als:
1 : 10^{-2} : 10^{-14} : 10^{-39}

Hoe moeten we deze zo verschillende natuurkrachten toch ooit unificeren?

DERDE MANIER:

In m'n eigen gegevens (ooit overgenomen uit een artikel) vond ik dit overzicht:

NAAM		SYMBOOL		
		Deeltje	Anti-deeltje	
Foton		γ		
Lepto- Nen	Neutrino	$\nu_e \quad \nu_\mu$	$-\nu_e \quad -\nu_\mu$	
	Elektron	e^-	e^+	
	Muon	μ^-	μ^+	
H A D R O N E N	Me- So- Nen	Pion	$\pi^+ \quad \pi^0 \quad \pi^-$	
		Kaon	$K^+ \quad K^0 \quad -K^0 \quad -K^-$	
		Eta	η	
	Ba- Ryo- nen	Proton	P	P^-
		Neutron	N	n^-
		Lambda	Λ	Λ^-
		Sigma	$\Sigma^+ \quad \Sigma^0 \quad \Sigma^-$	$-\Sigma^+ \quad -\Sigma^0 \quad \Sigma^-$
Cascade	$\Xi^0 \quad \Xi^+$	$-\Xi^0 \quad -\Xi^+$		
Omega	Ω	$-\Omega^-$		

Interessant, want nu zien we ook de symbolen die bij de diverse deeltjes horen. We zien wel weer nieuwe namen en categorieën, waar ik op m'n zoektocht nog langs moet. Echt wijzer word je (ik) hier ook niet van!

VIERDE MANIER:

Er zijn nog vele andere manieren om de deeltjes te rangschikken. Elke keer leer je weer iets meer, maar of het daardoor ooit duidelijker wordt? We kunnen bijvoorbeeld ook spreken over “elementaire” deeltjes en de rest zijn dan “niet-elementaire” deeltjes dus. Of die elementaire deeltjes echt elementair zijn? Dat weet niemand zeker, maar... de wetenschap denkt van wel!

- **Elementaire** deeltjes:

De tot nu bekende elementaire deeltjes zijn: quarks, elektronen en neutrino's.

- **Niet-elementaire** deeltjes:

De belangrijkste niet-elementaire deeltjes zijn: gluonen, gravitonen en fotonen.

Snel klaar dus. Een andere manier is het zog. “standaardmodel”:

VIJFDE MANIER:

HET STANDAARDMODEL

KRACHTDRAGERS				HIGGS
G gluon	γ foton	w^\pm W deeltje	Z Z deeltje	Φ Higgs boson

QUARKS		LEPTONEN	
U up quark	D down quark	E Elektron	ν_e elektron neutrino
C charm quark	s strange quark	M Muon	ν_μ mu neutrino
t top quark	b bottom quark	τ tauon	ν_τ tau neutrino

Het “standaard model” zou, volgens de wetenschap van nu, de beste manier zijn om de deeltjes te categoriseren. (Ik hoop het, maar zie het niet!). Met het standaardmodel (“SM”) heeft men veel kunnen verklaren, ware het niet dat er iets ontbreekt: het al eerder genoemde “Higgsboson”, een oprisping van het stroperige “Higgsveld”, een hypothetische deeltje, waarmee men o.a. het begrip “massa” hoopt te verklaren. Men hoopt dit deeltje in 2007 te vinden, als de nieuwe 27 km lange tunnel van CERN klaar is en de “LHC” (large hadron collider) in werking gaat.

Belangrijke (hm, hm) opmerking over massa van deeltjes:

De massa van deeltjes wordt normaal aangegeven in Kg. Energie van deeltjes in Elektronvolt (eV). Daarbij gaat men uit van het elektron, dat een “elementaire lading” heeft van: $1,6021892 \times 10^{-19}$ Coulomb. Deeltjes met deze “elementaire lading” zijn niet alleen de elektronen, ook positron en proton hebben deze lading! Daarbij zijn dan elektronen negatief, en positronen en protonen positief geladen. Doorloopt een lading van 1 Coulomb een spanningsverschil van 1 Volt, dan komt dat overeen met 1 Joule energie! De definitie van Elektronvolt luidt nu:

“Als een deeltje met de elementaire lading een spanningsverschil van 1 Volt doorloopt, verkrijgt het een hoeveelheid energie van 1 Elektronvolt, gelijk aan

$$\mathbf{1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Joule.}”$$

Deze energie kunnen we met Einsteins $E = m \cdot c^2$ omrekenen in kg (massa),

Want, we kunnen ook: $m = E : c^2$! schrijven:

$$\mathbf{massa = Energie \text{ (in Joules) : lichtsnelheid}^2}$$

De massa van deeltjes kunnen we dus ook (en dit wordt vaak gedaan) aangeven in :

$$\mathbf{Elektronvolt : c^2} \text{ (} c = 299.800.000 \text{ m/s} = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s)}$$

1 eV/c² komt dus overeen met een massa van:

$$1,6021892 \cdot 10^{-19} : (2,998 \times 2,998 \times 10^{16}) = \underline{1,782586 \times 10^{-34} \text{ kg}}$$

De afgeleide vormen zijn: KeV/c² (=1000 eV/c²), MeV/c² (=1000.000 eV/c²) en GeV/c² (=1000.000.000 eV/c²) of: kilo-, mega- en giga-**elektronvolt/c²**.

De (rust)massa van een elektron is bekend, deze bedraagt $9,109534 \times 10^{-31}$ kg. Deze kunnen we nu omrekenen in eV/c² volgens:

$$\text{Massa v/e elektron (Kg) : massa van 1 elektronvolt/c}^2 = \text{massa v/e elektron in MeV/c}^2.$$

$$9,109534 \times 10^{-31} \quad : \quad 1,782586 \times 10^{-34} \quad = \quad 0,511029145297 \text{ MeV/c}^2.$$

We kunnen dus zeggen dat de **rustmassa van een elektron 0,511 MeV/c²** is!

ZESDE MANIER

We kunnen de deeltjes ook volgens bepaalde eigenschappen indelen. Er zijn namelijk allerlei eigenschappen van deeltjes die van belang zijn om ze beter te begrijpen, zoals:

- **Massa**

Er zijn deeltjes met veel massa, weinig massa maar ook met zo weinig massa dat men niet zeker is óf ze wel massa bezitten.

- **Spin**

Spin is de hoeveelheid “draaiing” van een deeltje. Men dacht namelijk vroeger dat deeltjes zouden draaien, ofwel “spinnen”. Later trok men dit weer in. Of ze echt draaien? De één zegt van wel, de ander zegt van niet en weer een ander zegt dat het niet belangrijk is! Volgens mij weet niemand dat zeker, maar als ze niet echt draaien dan zouden ze zich gedragen alsóf ze draaien. Het zouden dus zeer kleine toltjes kunnen zijn, maar omdat de deeltjes, bijvoorbeeld elektronen, zo klein zijn mag je ze daarmee (volgens de geleerden) toch niet vergelijken. Onder de “spin” van een deeltje verstaat men het “momentum” (E) of het draaimoment van een deeltje en deze kan rechtsom (spin up) of linksom (spin down) zijn. Spin up is de normale toestand (“ground state”).

Spin is een raar begrip: men weet er veel van, men rekent ermee, maar, zo blijkt steeds weer, men begrijpt er nog maar bitter weinig van, want de geleerden weten nog niet eens zeker of die deeltjes nu echt draaien of niet! Maar we kunnen ons óók moeilijk voorstellen dat een deeltje eigenlijk een golf is.....!

Spin wordt aangegeven als een heel getal of als breuk. Er bestaat “heeltallige” en “halfallige” spin. Als een deeltje spin $\frac{1}{2}$ of $1\frac{1}{2}$ heeft moet het $2 \times$ “draaien” om weer in de uitgangspositie terug te keren. Bij heeltallige spin: 0, 1, 2 of 3 is $1 \times$ draaien voldoende. Wat moet ik me daarbij nu weer voorstellen? Nou ja het is eigenlijk een heel klein golfje dat zelf roteert en zo’n golfje zou dus soms pas na twee maal draaien weer in z’n uitgangspositie terugkeren.

Er zijn aldus:

- Deeltjes met heeltallige spin: de “bosonen”, de wisselwerkingsdeeltjes.
 - Deeltjes met halfallige spin: de “fermionen”, de materiedeeltjes.
-

- **Pauliverbod**

Deeltjes voldoen wel of niet aan het “Pauliverbod”! Wat is dat nou weer? Wel, een zekere Wolfgang Pauli postuleerde ooit een theorie waaruit bleek dat twee “fermionen” (en daaronder vallen de deeltjes met halfallige spin zoals de elektronen) niet samen in de zelfde “kwantumtoestand” kunnen verkeren. Hieruit kan men bijvoorbeeld verklaren waarom elektronen in “schillen” en “subschillen” om de kern bewegen. En wat zijn die “kwantumtoestanden” dan wel? Er zijn vier kwantumgetallen:

- Hoofdkwantumgetal “n”, betreft de elektronenschillen.
- Nevenkwantumgetal “l”, betreft de subschillen of “orbitalen”.
- Magnetisch kwantumgetal m_l , betreft het “magnetisch moment”.
- Spinkwantumgetal: “up” of “down”.

Ja, maar nu weet ik nog niets! Rustig maar, dat gaan we uitzoeken!

- **Lading**

Deeltjes kunnen als negatief en positief geladen of neutraal (ongeladen) gezien worden. Verder heeft elk deeltje een antideeltje. Zo hebben we elektronen (negatief geladen) en hun antideeltjes, de “positronen” (positief geladen). Lading wordt voor deeltjes vaak als een getal aangegeven, waarbij men uitgaat van een proton, die men lading: “1” heeft gegeven, zodat een elektron dan automatisch lading “-1” heeft. Maar... lading wordt toch in Coulomb aangegeven? Inderdaad en deze lading “1” komt overeen met $1,60219 \times 10^{-19}$ Coulomb!

Toen later de quarks ontdekt werden moest men vaststellen dat deze een lading kleiner dan één moesten hebben, dat was even slikken want men dacht dat “1” de elementaire lading was! Wat “lading“ van zo’n deeltje trouwens precies is weet blijkbaar ook nog niemand!

- **Op/neer, tover/vreemd, top/bodem, groen/rood/blauw, magenta/cyaan/geel.**

Deze begrippen gebruikt men bij **quarks**, daar deze deeltjes eigenschappen hebben die men niet erg begrijpt. Men heeft ze daarom maar een naam gegeven. Men spreekt bij quarks over “smaak” en “kleur”.

- **Stabiel of onstabiel.**

Vele nieuwe deeltjes zijn onstabiel en eigenlijk niet zo belangrijk. Ze hebben meestal een onvoorstelbaar korte levensduur. Echt stabiele deeltjes zijn er eigenlijk maar weinig: protonen, neutronen (alleen in de atoomkern), quarks, elektronen en neutrino’s.

Alle andere deeltjes zijn niet stabiel!

Deeltjes ontdekken

Het is natuurlijk heel knap dat de wetenschap zoveel deeltjes heeft ontdekt in de deeltjesversnellers en daar ook al zoveel van weet: massa, levensduur etc. Maar... ik denk ook wel eens: als je met een geweer op een baksteen (of een ander stuk steen) schiet, krijg je ook allerlei soorten brokjes en brokstukken. En die brokjes hebben natuurlijk allemaal een verschillende vorm en gewicht (“massa”) en zullen verschillende kanten opvliegen. En die scherfjes en brokstukjes, ga je die dan allemaal bestuderen en namen geven? Een huis wordt gemaakt van bakstenen en niet van die brokstukjes! Maar goed, deeltjesversnellers zullen toch wel functioneel zijn en veel verduidelijken. Maar..... er is nog veel meer onduidelijk!

Hoe ontdekt (en ontdekte) men eigenlijk al die deeltjes? Een zeer belangrijk instrument was vroeger de “nevelkamer”, uitgevonden door een zekere “Wilton”. Deze bestaat uit een (ik denk glazen) cilinder met een zuiger, met daarin geen lucht, maar wel wat water. Trekt men aan de zuiger, dan vergroot men het volume en ontstaat er onderdruk. Daardoor verdampt het water en vormt er zich een nevel in de cilinder. Laat men nu deeltjes door die nevel bewegen, dan laten ze, al zijn ze nog zo snel en kortlevend, een goed zichtbaar spoorje achter en deze spoorjes “in de mist” kan men dan fotograferen! Door er magneetspoelen bij te zetten, kan men de deeltjes af laten buigen en zo gegevens verzamelen over lading, massa en zo. Door meting van lengte en tijd van een spoor kan men tevens de snelheid te weten komen. Op deze wijze heeft men vroeger veel kennis opgedaan betreffende richting, snelheid, lading, levensduur enzovoort. Er zijn nog andere methodes. Men kan deeltjes sporen laten trekken direct in de foto-emulsie van een fotoplaat zelf. Ook kwam men met de “dradenkamer” op de proppen, een kamer met dunne metalen draden waarop men spaninkjes kan zetten die de deeltjes op een bepaalde manier kunnen beïnvloeden.

In 1960 vond Donald Glaser het “bellenvat” uit. Dat bestaat uit een vat, gevuld met een transparante vloeistof, die verhit wordt tot net onder het kookpunt. Laat men nu deeltjes door de vloeistof vliegen dan geven deze mooie duidelijke “bellen”sporen, die gefotografeerd kunnen worden.

Bij het berekenen van gegevens en eigenschappen van de te bestuderen deeltjes, speelt de computer tegenwoordig natuurlijk ook een steeds belangrijkere en onmisbare rol!

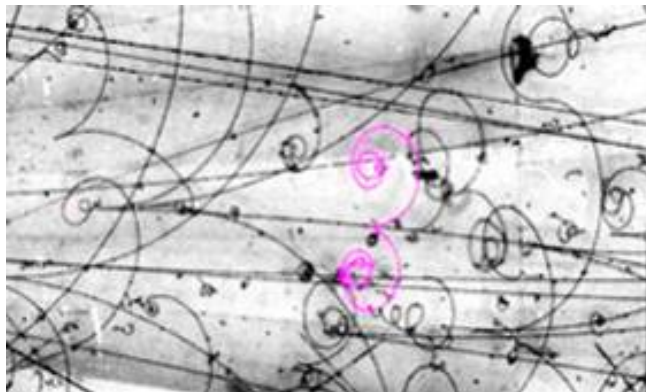


Fig 11.1 Deeltjes in bellenvat

Krachtvoerende deeltjes

Dat de materiedeeltjes de “materie” vormen is nog wel enigszins voor te stellen maar... hoe kunnen deeltjes nu “kracht voeren”? Hoe kan de zwaartekracht met deeltjes (“gravitonen”) invloed uitoefenen, aantrekken? Hoe trekt de zon aan de aarde, hoe trekt de aarde aan mij aan alles, aan de materie? En... kracht is dus eigenlijk een wisselwerking?

Als je deze “wisselwerkingsdeeltjes” als knikkertjes voorstelt, en je smijt een handvol van deze knikkers tegen een licht voorwerp, dan zal dat voorwerp door de “impact” waarschijnlijk iets verschuiven. Schiet je met hagel dan kan je een vogel of een haas dodelijk treffen door de “kracht” van de loden of metalen korrels. Dat je met deeltjes dus een (afstotende) kracht kan uitoefenen is dus wel begrijpelijk. Maar... hoe zit het nu met een “aantrekkende” kracht? Hoe kan je met “knikkertjes” of “hagel” iets aantrekken? Hoe kunnen “gravitonen” (als ze bestaan, want ze zijn nog nooit aangetoond!) nu een voorwerp of zelfs een hemellichaam “aantrekken”? Ik heb helaas nog nooit een goede beschrijving van dit fenomeen kunnen vinden.

De verklaring van Einstein over die ene aantrekkende kracht, de zwaartekracht, is toch wel heel anders. Hij zag de zwaartekracht namelijk als “kromming van de ruimte” en kon daarmee toch wel enigszins begrijpelijk uitleggen hoe deze kracht werkt. Toch voorspelde hij ook zwaartekrachtgolven. En... dan hebben we nog niet de andere drie aantrekkende krachten verklaard: de sterke en zwakke kernkracht en de elektromagnetische kracht! Ook hebben we nog het (ferro)magnetisme, behoorlijk onbegrijpelijk!

Terug naar de zwaartekracht. Als Einsteins theorie van gekromde ruimte niet klopt en er worden inderdaad “gravitonen” ontdekt, wat dan? Als dus de zon (zwaarte)kracht uitoefent en aan de aarde “trekt”, zouden deze gravitonen dan heen en weer vliegen tussen zon en aarde? “Ja”, zegt men, “om informatie uit te wisselen!” Zeker om te weten hoe groot de massa is, zodat ze deze getallen in Newtons formule kunnen invullen! En nog steedshoe oefenen ze die kracht dan uit, waarmee trekken ze? We gaan in het volgende hoofdstuk maar weer verder met wat men wel weet!

Intussen zie ik het op al deze manieren rubriceren van deeltjes niet meer zitten. Het lijkt een beetje op de vraag of ik drink en ik dan antwoord: “Ja, bij twee gelegenheden: als ’t regent en als het niet regent...”, “bij mooi weer en bij rotweer” enz.

Aldus enigszins moedeloos geworden denk ik dat de beste (minst slechte) methode eigenlijk een zo volledig mogelijke, lijst van deeltjes, met beschrijving en gegevens, is! Voor geïnteresseerden volgt nu een alfabetische lijst van al die deeltjes.

OVERZICHT van de bekende DEELTJES

ANTI-.....	Van elk geladen deeltje bestaat een antideeltje: anti-quark, anti-elektron (“positron”) etc. Deze deeltjes behoren tot de antimaterie. Ontmoet een deeltje zijn antideeltje, dan vindt “annihilatie” terug, d.w.z. er blijft alleen energie over, die eventueel weer een nieuw deeltjespaar kan vormen, want er is altijd behoud van energie en $E = m c^2$!
BARYON	De baryonen zijn de materiedeeltjes, die uit 3 quarks opgebouwd zijn. De “protonen” en de “neutronen” zijn baryonen, bestaande uit up- en downquarks. Er zijn zeer veel baryonen, want er zijn 2 maal 8 quarks. De meeste hebben een zeer kort leven en vervallen dan bijv. tot proton of neutron. Daarbij komen dan weer mesonen (quark-antiquark deeltjes) vrij ook met zeer kort leven. Baryon: letterlijk zwaar deeltje. Ze behoren tot de hadronen.
BOSON	De bosonen zijn de krachtvoerende of wisselwerkende deeltjes. Deze deeltjes zouden dus de 4 heelalkrachten, sterke, zwakke, elektromagnetische en zwaartekracht overbrengen. Bosonen hebben “heeltallige spin”, dus 0, 1, 2,..... Tot de bosonen behoren: Fotonen, Gluonen, Gravitonen, W-deeltjes, Z-deeltjes (en het Higgs boson, zie aldaar). Bosonen zijn vernoemd naar de beroemde Indiase geleerde Satyendra Nath Bose, die ook met Einstein samenwerkte. De samenwerking tussen hen heeft ook geleid tot het begrip “Bose-Einstein condensaat”, een hypothese over het condenseren van Helium bij zeer lage temperaturen.
BOTTOM -QUARK	Zie “Quark”. De bottom-quark is één van de zes quarks die bekend zijn. Lading: $-1/3$, massa $4,7 \text{ GeV}/c^2$. Symbool: b en \bar{b} .
CHARM -QUARK	Zie “Quark”. De charm-quark is één van de zes quarks die bekend zijn. Lading: $+2/3$, massa $1,5 \text{ GeV}/c^2$. Symbool: c en \bar{c} .
DOWN -QUARK	Zie “Quark”. De down-quark is één van de zes quarks die bekend zijn. Lading: $-1/3$, massa $0,1 \text{ GeV}/c^2$. Symbool: d en \bar{d}
D+	Meson bestaande uit een charm/anti- downquark of anti-charm/up quark Symbool D+. Massa $1,869 \text{ GeV}/c^2$, Zeer korte levensduur.
D _s	Meson bestaande uit charm/anti-strange of anti-charm’ strange quark. Zeer korte levensduur.
DELTA	Baryonen, bestaande uit up- en down quarks. Er zijn er 4: uuu, uud, udd en ddd, met lading +2, +1, 0 en -1. Zeer korte levensduur. Symbool: δ
ELEKTRON	(Zeer waarschijnlijk) elementair en absoluut stabiel deeltje, met zeer kleine massa. Een elektron is (tot nu toe) het lichtste deeltje. Behoort tot de “leptonen” (zie aldaar). De elektronen vormen in “schillen” een wolk om de atoomkern en vormen zo met de kern de atomen van de elementen. Een elektron heeft de standaard lading -1 (negatief). Deze standaardlading $1 = 1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb. Massa $511 \text{ KeV}/c^2 = \pm 9,10 \times 10^{-31} \text{ kg}$. Spin = $\frac{1}{2}$.

ELEKTRON-	Een van de drie soorten neutrino's.
NEUTRINO	Massa $< 7 \times 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$.
ETA -c	Kortlevend meson bestaande uit een charm- en een anti charm-quark. Lading 0, Massa $2,979 \text{ GeV}/c^2$, Spin 0, Symbool η_c .
FERMION	Fermionen zijn de materiedeeltjes, in tegenstelling tot de "bosonen" die kracht (of wisselwerking) overbrengen. Fermionen hebben "halfvallige spin", dus $1/2$, $3/2$... "Fermion", genoemd naar de beroemde Italiaanse atoomgeleerde "Enrico Fermi", is een verzamelnaam, waar de volgende deeltjes toe horen: Lepton, Hadron, Pion, Tauon, Elektron, Positron, Muon, Proton, Neutron, Neutrino.
FOTON	De fotonen (behorende tot de bosonen) brengen de elektromagnetische kracht over. "Elektromagnetische straling", zoals licht, gammastralen etc. bestaat dus uit fotonen. Fotonen hebben geen massa, maar wel energie! Hoe korter de golflengte hoe meer energie! Daar energie volgens Einsteins formule equivalent is met massa ($E = m c^2$) worden fotonen wél door de zwaartekracht beïnvloed, zoals aangetoond is. Een vreemde eigenschap van fotonen is dat deze zich in 't vacuüm altijd met de lichtsnelheid bewegen en een oneindig bereik hebben (als ze niets raken op hun weg). Ze kennen ook geen tijd! Volgens de Einsteinformule kunnen ze niet anders, daar fotonen massaloos zijn. Is de snelheid minder dan c (in vacuüm) dan heeft een foton geen energie en bestaat niet! Photos is Grieks voor licht. Massa 0, symbool γ .
GLUON	Gluonen, behorende tot de bosonen, zouden de deeltjes zijn die de "sterke kernkracht" overbrengen. Dit is de kracht die de neutronen en protonen in een atoomkern samenhoudt. Gluonen zijn letterlijk "lijmdeeltjes". Zij houden de quarks bij elkaar en die vormen zo de protonen en neutronen.
GRAVITON	Gravitonen, behorende tot de bosonen, zijn hypothetische deeltjes die de zwaartekracht zouden overbrengen (Hoe zouden ze dat dan wel doen?) Gravitonen zijn nog nergens gedetecteerd!
HADRON	De verzamelnaam: "hadronen" wordt gebruikt voor deeltjes, waarvan de belangrijkste eigenschap is dat zij beïnvloed worden door de sterke wisselwerking, de kracht die de atoomkernen bij elkaar houdt. Verder zijn het deeltjes met zogenaamde "heeltallige spin". Tot de hadronen behoren de kerndeeltjes: protonen en neutronen, die op zich weer uit "quarks" bestaan. Verder ook de "mesonen", kortlevende, onstabiele deeltjes die (meestal) bestaan uit een quark en een anti-quark en de "baryonen", bestaande uit 3 quarks. Hadros betekent: sterk. (De hadronen worden beïnvloed door de sterke kernkracht.)
HIGGS' BOSON	Dit is een hypothetisch, wisselwerkend deeltje dat bedacht is door Peter Higgs om te verklaren waarom deeltjes verschillende massa's hebben. Men veronderstelt een +, - en een neutraal Higgsdeeltje. De massa moet rond de 100 GeV . Liggen.

Deze deeltjes zouden in het “Higgs veld” opereren. Men hoopt ze in 2007 te ontdekken in de “Grote Hadronen Botser” die bij Geneve in aanbouw is.

- HYPERON Hyperonen zijn baryonen waarbij één der quarks een strange quark is. Zeer korte levensduur: $\pm 10^{-10}$ s.
- IJKDEEL “IJKdeeltje” is een andere naam voor “wisselwerkings-“ of “krachtvoerend” deeltje, behoort dus tot de bosonen. Ze “voeren” de vier natuurkrachten.
- KAON Kaonen behoren tot de mesonen. Het zijn (onstabiele) deeltjes die uit een quark en een anti-quark bestaan. Het zijn deeltjes die men in versnellers door botsing verkrijgt. De levensduur is zeer kort: $10^{-8} - 10^{-10}$ seconden. Massa $0,494 \text{ GeV}/c^2$, Lading -1, Spin 0, Symbolen: K^- , K^0 , resp. bestaande uit de quarks $s\bar{u}$ en $d\bar{s}$
- LAMBDA Lambda's behoren tot de fermionen en bestaan uit een up-, down en een strange quark (uds). Zeer korte levensduur. Lading 0, Massa $1,116 \text{ GeV}/c^2$, SPIN $\frac{1}{2}$. Symbool Λ .
- LEPTON Men vermoedt dat “leptonen” fundamentele deeltjes zijn, die dus niet verder deelbaar zijn. De leptonen behoren tot de fermionen (halfvallige spin). Tot de leptonen behoren de (elektrisch geladen) elektronen, muonen, tauonen met hun antideeltjes, verder ook de neutrale (ongeladen) neutrino's en anti-neutrino's). Leptonen: letterlijk lichte deeltjes (maar ze zijn niet altijd licht!).
- MAGNETION Hypothetisch, zelfverzonnen deeltje dat de magnetische kracht zou voeren. Ik zou trouwens niet weten hoe ze dat doen!
- MESON Mesonen zijn onstabiele, zeer kortlevende deeltjes, die (meestal?) bestaan uit een charmquark en een anti-charmquark. Ze behoren tot de (bosonische) hadronen. Ze ontstaan bij het verval van kortlevende baryonen zoals hyperonen. Weten jullie het nu? Levensduur 10^{-23} s. Er zijn 6 soorten mesonen: de “pionen” (π^+), “kaonen” (K^- en K^0), verder de Rho (ρ^+), de D^+ mesonen en de eta-c (η_c) mesonen. Mesonen: letterlijk middendeeltjes (tussen zware en lichte).
- MINION Zelfverzonnen naam voor het Planckdeeltje. Deze Planckdeeltjes zijn te klein om waargenomen te worden en zijn dus ook hypothetisch!
- MUON Muonen, vroeger Mu-mesonen, zijn in 1936 ontdekt. (Zijn ze dan net zo oud als ik? Ze leven in ieder geval korter!). Later bleken ze te behoren tot de leptonen, niet tot de mesonen! Waarom niet? Muonen bleken later niet uit quarks te bestaan! Het zijn een soort zware elektronen die heel kort bestaan: $2,2 \times 10^{-6}$ seconde. Ze hebben een lading -1 of $+1$. Massa $105 \text{ MeV}/c^2$ (207 maal elektronmassa). Symbool: μ .
- MUON-NEUTRINO Één der drie soorten neutrino's. Ze komen o.a. vrij als kosmische straling de aardatmosfeer binnendringt. Ze ontstaan door botsing met de zuurstof- en stikstofatomen. Ook als een “pion” uiteenvalt ontstaat een muon-neutrino (en een muon). Lading 0, Massa $< 0,0003$, symbool ν_μ .

- NEUTRINO** Neutrino's blijken ook elementaire deeltjes te zijn. Deeltjes met (denkt men) lading 0 en geen of zeer weinig massa. Daardoor zijn ze zeer moeilijk te detecteren. In 't heelal komen ongelooflijk veel neutrino's voor. Men schat 300 per cc ruimte. Als ze dus toch een ietsje massa hebben, een paar eVolts is al genoeg, kunnen ze misschien de $\pm 90\%$ heelal massa, die men kwijt is, verklaren. Neutrino's worden beïnvloed door de zwakke kernkracht en (als ze massa hebben) misschien ook door de zwaartekracht. Neutrino's behoren tot de "leptonen" en "fermionen", en hebben halftallige spin. Er zijn 3 soorten neutrino's nl. de elektron-, de muon- en de tau-neutrino's. Ze ontstaan o.a. bij radioactief kernverval.
- NEUTRON** Kerndeeltje ("nucleon") behorende tot de "baryonen" en de "fermionen" (zie aldaar). Een neutron bestaat uit een up- en twee downquarks (udd) samen gehouden door "gluonen". Neutronen hebben lading 0 en hebben grote invloed op de massa van een atoom(kern). Atoomkernen van eenzelfde element kunnen verschillende aantallen neutronen hebben. Dergelijke atomen noemt men: "isotopen", d.w.z. zelfde plaats (in het periodieke systeem). Massa: $0,940 \text{ GeV}/c^2$, Spin $\frac{1}{2}$, Symbool **n**. Een neutron in een atoomkern is stabiel maar is hij eenmaal op zichzelf, dan is het snel gedaan met hem: levensduur: maximaal 1000 seconden.
- NUCLEON** De verzamelnaam voor kern-("nucleus")deeltjes is: "nucleonen". Protonen en neutronen behoren dus tot de nucleonen.
- OMEGA** Deeltjes behorende tot de fermionen. Ze bestaan uit 3 strange quarks. Lading -1, Massa $1,672 \text{ GeV}/c^2$, Spin $\frac{1}{2}$, Symbool Ω . Zeer korte levensduur.
- PION** Pionen zijn "mesonen" met de kleinste massa: 135 MeV! Er zijn drie soorten: +, - en neutraal. Ontdekt in 1947, in foto-emulsie's op grote hoogte! Ze kwamen met de kosmische straling mee en bestaan uit een up-quark en een anti-down quark(?). Ze zouden met de sterke kernkracht te maken hebben? Ze worden ook pi-mesonen (π -mesonen) genoemd. Lading 1, -1 of 0, Spin $\frac{1}{2}$. Symbool π^+ (voor de positieve pionen).
- PLANCK-Deeltje** Hypothetisch deeltje dat te klein is om waargenomen te worden. Orde van Grootte: 10^{-35} m . Massa = $2,1 \times 10^{-8} \text{ kg}$. Deze massa wordt berekend met de "Planckconstante" volgens $c \cdot h/2\pi \cdot G$ (G = gravitatieconstante).
- POSITRON** Een positron is eigenlijk een "anti-elektron". Positronen hebben een positieve lading: +1 eV. Verder zijn ze gelijk aan elektronen. Symbool e^+ . Ze worden soms ook "positonen" genoemd.
- PROTON** Meest voorkomende "hadron" in 't heelal. Zij vormen samen met de neutronen de atoomkern, maar: Waterstofkernen bezitten geen neutronen! Protonen behoren tot de baryonen, zijn uiterst stabiel en hebben lading +1. Een atoomkern van Waterstof bestaat dus slechts uit één proton en Waterstof is daardoor het meest voorkomende element! (De Waterstofisotopen Deuterium en Tritium hebben wél respectievelijk 1 en 2 neutronen in de kern.)

Massa: $0,938 \text{ GeV}/c^2 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Spin $\frac{1}{2}$, symbool **p**.

Een proton heeft een massa die 1836,1 maal die van het elektron is.

Een proton bestaat uit 2 up-quarks en 1 down-quark (uud) die samen “gelijmd” zijn door “gluonen” of “lijmdeeltjes”.

QUARK Men denkt dat de quarks fundamentele materiedeeltjes zijn. Ze behoren tot de “fermionen” en zijn de bouwstenen van de kerndeeltjes: protonen en neutronen. Losse quarks zijn nog nooit waargenomen: in stabiele vorm zijn ze altijd met hun drieën, maar ze komen ook als (instabiele) paren voor. Zo bestaan mesonen uit 1 quark en 1 anti-quark, maar zijn zeer kortlevend. Ook bestaan er (waarschijnlijk?) deeltjes uit 4 en 5 quarks (“pentaquark”). Er zijn 6 soorten quarks in 3 “kleuren”: Rood, Groen en Blauw. Met z’n drieën komen ze altijd kleurneutraal voor d.w.z. rood, groen en blauw die samen wit zijn (RGB = wit).

Omdat men de eigenschappen van de verschillende quarks niet goed snapt (hoe kan dát nu toch? Wat vreemd!) heeft men de quarks ook nog onderverdeeld in 6 “smaken”:

Up-quark (u)	Down-quark (d)
Charm-quark (c)	Strange-quark (s)
Top-quark (t)	Bottom-quark (b)
Lading $+2/3$	Lading $-1/3$

Hiermee kunnen we nu wél begrijpen hoe het zit met de lading van protonen en neutronen. De lading van een proton (uud) is $+1$, want $+2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$. De lading van een neutron (udd) is 0 : $+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$.

Waarom moeten er altijd 3 quarks zijn om een stabiel kerndeeltje te vormen? Deze vraag heeft men nog niet beantwoord! In ieder geval zijn nog nooit losse quarks waargenomen. Moet ik het dan zelf maar verzinnen?

RESONAN-TIES Deeltjes met zeer korte levensduur ($<10^{-22}$ sec.) die bij botsingen in versnellers kunnen ontstaan. Ze zijn dus wel waargenomen maar hebben (denk ik) verder weinig betekenis.

RHO Behoren tot de mesonen. Ze bestaan uit een up-anti-downquark of een anti up/down-quark. Zeer korte levensduur: Lading $+1$, Massa $0,770$, Spin 1 . Symbool ρ^+ .

SIGMA Behoren tot de baryonen. Er zijn er 3: + uus, - uds en neutrale dds. Spin $\frac{1}{2}$. U = up-quark, s = strange quark, d = down quark. Zeer kortlevend. Symbool ζ (of Σ).

STRANGE-QUARK Zie “Quark”. De strange-quark is één van de zes quarks die bekend zijn. Lading: $-1/3$, Massa $0,15 \text{ GeV}/c^2$, symbool **s**.

TACHYON Hypothetisch deeltje dat sneller dan het licht zou kunnen bewegen! Bestaan die dan? Volgens sommigen wel! Ze kunnen misschien, heel kort, maar toch heel even bestaan. Tachyonen: snelle deeltjes.

TARDYON Tegenover de tachyonen staan de “tardyonen”, de deeltjes die dus niet sneller dan het licht bewegen.

TAUON	Tardyonen: letterlijk langzame deeltjes. Lepton met lading -1 , Massa $1,7771 \text{ GeV}/c^2$. Levensduur $2,91 \times 10^{-13} \text{ s}$.
TAU NEUTRINO	Één der drie soorten neutrino's. "Ontstaat als een tauon uiteenvalt". Lading 0 , Massa $< 0,03 \text{ GeV}/c^2$, Symbool $\nu\tau$.
TOP -QUARK	Zie "Quark". De top-quark is één van de zes quarks die bekend zijn. Lading: $+2/3$. Zwaarste quark, sterker nog, tot nu toe zwaarst bekende deeltje met massa $176 \text{ GeV}/c^2$, $200.000 \times$ de massa van een elektron! De topquark is de laatste quark die ontdekt is. Men vermoedde al lang het bestaan, maar men "vond" hem pas in 2002! Symbool t .
VECTOR- BOSONEN	De W- en Z-deeltjes behoren tot deze groep. Het zijn "intermediaire vectorbosonen". Zij zouden de dragers van de zwakke kernkracht zijn. Zeer korte levensduur. De massa is zeer groot: $90 - 100$ maal de protonmassa. Een vector is een kracht die met 3 coördinaten (x,y en z richting) wordt aangegeven.
W-deeltje	W-boson of W-deeltje. Er zijn twee W bosonen, nl. W^+ en W^- . De W-deeltjes zijn de krachtvoerende deeltjes die de zwakke kernkracht (van radioactief verval) overbrengen. Massa $\pm 90 \times$ massa van proton. Zeer korte levensduur.
Z-deeltje	Z-boson of Z-deeltje. Het Z-deeltje is, evenals het W-deeltje, een krachtvoerend deeltje van de zwakke kernkracht, maar heeft geen lading. Massa $\pm 100 \times$ massa van proton. Zeer korte levensduur.
Xi Deeltje	Baryon bestaande uit 3 quarks: uus (0) en dss (-1). u = up-quark, d = down-quark, s = strange-quark. Zeer korte levensduur.