

Universitaire Instelling Antwerpen
Departement Wiskunde-Informatica

Leidt het Standaardmodel in
de elementaire deeltjesfysica
tot een quantum veldentheorie van Alles ?

Sven Maerivoet

2e licentie Informatica
Academiejaar 2000 - 2001

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Probleemstelling	1
1.2	De achtergrond van de moderne theorieën	2
1.2.1	De relativiteitstheorie	2
1.2.2	De quantummechanica	2
1.2.3	Problemen bij unificatie	2
1.3	Vereniging speciale relativiteitstheorie en quantummechanica	3
1.3.1	De quantum veldentheorie (eerste poging)	3
1.3.2	De quantum veldentheorie (tweede poging)	4
2	Het Standaardmodel	5
2.1	De elementaire deeltjes	5
2.1.1	Fermionen	6
2.1.2	Bosonen en de vier fundamentele natuurkrachten	6
2.1.3	Hadronen	8
2.2	Natuurconstanten	8
2.3	Massa en de rol van het Higgs-boson	9
3	Theorieën van Alles	10
3.1	Quantumgravitatie	10
3.2	Supersymmetrie (SUSY)	10
3.3	Snaartheorie (<i>string theory</i>)	11
4	Conclusies	12
4.1	Hogere energieën (kleinere afstanden)	12
4.2	De rol van God	12
4.3	Determinisme (en vrije wil)	12
4.4	Reductionisme en complexiteit	13
4.5	Conclusie	13

1 Inleiding

Al jarenlang ben ik sterk geboeid door de natuurkunde en de wiskunde die erachter schuilt. Er bestaan in mijn ogen twee grote disciplines : de astrofysica en de quantummechanica, of eenvoudiger uitgedrukt : de leer van het hele grote en de leer van het hele kleine. Dit artikel vormt dan ook een goed excuus om de zaken eens op een rijtje te zetten. Van de zojuist vernoemde twee disciplines bespreek ik hier de meest elementaire, namelijk de leer van het hele kleine. Dat achter deze eenvoudige terminologie een verschrikkelijk complexe wereld schuilgaat zal op het einde van mijn betoog duidelijk zijn.

Ik begin met het schetsen van de probleemstelling, waarna ik een aantal algemene concepten – die men steeds in het achterhoofd dient te houden – uitleg en illustreer, zij vormen de basis van alle verdere theorieën. Vervolgens bespreek ik uitvoerig de oplossing die de fysici vandaag de dag gebruiken, namelijk het Standaardmodel in de elementaire deeltjesfysica (deze bespreking gebeurt vrij grondig aangezien het Standaardmodel in zijn globaliteit dient beschouwd te worden). Tot slot begeef ik me op enkele verdere denkpistes die de link naar algemene theorieën leggen en geef ik enkele kritische beschouwingen.

De informatie die in dit artikel verwerkt werd, is gebaseerd op de talrijke bronnen die U achteraan in de bibliografie kan terugvinden. Van direct belang tot het schrijven van dit artikel was de zeer interessante voordracht van Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft, gehouden aan de Universitaire Instelling Antwerpen in het academiejaar 2000-2001 naar aanleiding van het keuzevak *Studium generale*.

1.1 Probleemstelling

Vanuit empirisch standpunt is het mogelijk de natuur te beschouwen als zijnde opgebouwd uit diverse fundamentele delen. Omstreeks 400 jaar voor Christus' geboorte, sprak de Griekse wijsgeer Democritus al van de zogenaamde 'atomos' die de natuur om ons heen vormen. Eeuwen later, in 1898 bracht Joseph Thompson zijn 'atoommodel' op de voorgrond. Sindsdien werkten mensen zoals Max Planck, Albert Einstein, Ernest Rutherford, Niels Bohr, Ernest Schroedinger, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Louis de Broglie, Paul Dirac, Hideko Yukawa, Enrico Fermi, C.N. Yang, Robert Mills, Gerard 't Hooft, Martinus Veltman, . . . aan een verfijning van de oorspronkelijke theorie. Na het 'basiswerk' drongen zij, samen met Murray Gell-Mann, George Zweig, Sheldon Glasgow, Steven Weinberg, Abdus Salam, Richard Feynman, Leon Lederman en vele anderen, nog verder door in de atoomkern en brachten nieuwe feiten aan het licht.

Al de ontdekkingen die door deze mensen werden gedaan, bevestigen de instinctieve curiositeit van de mens : een steeds meer grensverleggende zoektocht naar de ultieme kennis. Men wil de natuur doorgronden, haar opbouw en werking volledig begrijpen. Van groot belang hierbij is het concept 'reductionisme' dat veronderstelt dat alles herleidbaar is tot de meeste elementaire bouwstenen van de materie.

Het *begrijpen* van de natuur leent zich ook tot het *beschrijven* ervan. Deze beschrijving gebeurt aan de hand van wiskundige modellen en het ontwerpen ervan vereist veel menselijke inventiviteit. Er is echter ook nog een andere, meer passionele manier van werken : het is niet alleen belangrijk te weten uit *wat* de natuur is opgebouwd en *hoe* deze werkt, ook een *diepgaander inzicht* mag zeker en vast niet ontbreken. Dit inzicht vertaalt zich in de diverse wetten die de natuur beheersen¹ en hierbij wordt gestreefd naar een *zo algemeen mogelijke* beschrijving. Dit

¹ . . . of beheerst de natuur de wetten ?

laatste geeft aanleiding tot het zoeken naar een Theorie van Alles².

Het probleem situeert zich dus op twee vlakken : enerzijds bepalen wat de elementaire bouwstenen van de natuur zijn en anderzijds op een zo algemeen mogelijke wijze beschrijven hoe deze bouwstenen met elkaar interageren.

1.2 De achtergrond van de moderne theorieën

Het begin van twintigste eeuw wordt gekenmerkt door de ontdekking van twee zeer belangrijke theorieën, namelijk de relativiteitstheorie en de quantummechanica. Beide theorieën vormen de basis waarop mijn verhaal verder bouwt en men dient steeds goed te beseffen wat elk van beide theorieën poogt te verklaren en op welk terrein ze zijn gedefinieerd. Na een korte bespreking van elke theorie wordt een oplossing voorgesteld die beide theorieën probeert te verenigen (zij het met beperkt succes) en de ruggengraat van het verdere werk (het zogenaamde *Standaardmodel*) zal vormen.

1.2.1 De relativiteitstheorie

De relativiteitstheorie, ontwikkeld door Albert Einstein, houdt zich bezig met de beweging van lichamen waarvan de snelheid vergelijkbaar is met de lichtsnelheid c . Ze beschrijft de geometrie van ruimte en tijd, ook wel gekend als het vierdimensionale ruimte-tijd-continuum. Een belangrijk gevolg van de theorie is dat deze snelheid c , gezien vanuit eender welk referentiestelsel, *constant* is (namelijk 299972 km/s) en dat geen enkel voorwerp sneller dan het licht kan bewegen. Einstein besepte ook dat er een equivalentie tussen massa en energie bestond en drukte deze relatie uit met de welgekende vergelijking $E = mc^2$ (met E de energie en m de massa).

Aanvankelijk werkte Einstein de zogenaamde *speciale relativiteitstheorie* uit, later betrok hij moeizaam het concept ‘gravitatie’ in deze theorie wat aanleiding gaf tot een veralgemening, namelijk de *algemene relativiteitstheorie*. Deze laatste onderscheidt zich van de eerste doordat ze betrekking heeft op een heel ander terrein van de natuurkunde, ze is namelijk enkel uitdrukkelijk van toepassing op hele zware objecten.

1.2.2 De quantummechanica

Deze theorie houdt zich bezig met de beschrijving van de wereld van het hele kleine, namelijk de elementaire deeltjes (er geldt evenwel dat de studie van veel-deeltjes systemen zoals vaste stoffysica ook tot de quantummechanica behoort). Belangrijk hierin is dat men deeltjes een golfkarakter (een zekere golflengte ν) toebedeelt (dit heet de deeltje-golf dualiteit) en dat men niet tegelijkertijd de positie en snelheid (of impuls) van een deeltje willekeurig nauwkeurig kan meten. Dit ‘onzekerheidsprincipe’ (in 1927 gepostuleerd door Heisenberg) wordt uitgedrukt door $\Delta X \cdot \Delta P \geq \hbar$ met $\hbar = h \div (2\pi)$ en h de constante van Planck ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J · s). In de allerbeste omstandigheden is er dus nog steeds een ondergrens (namelijk \hbar) !

1.2.3 Problemen bij unificatie

In het begin van de twintigste eeuw werden beide theorieën bekeken als zijnde gedefinieerd op twee totaal verschillende terreinen. Bij het bestuderen van elke theorie werd aanvankelijk geen

²In het Engels spreekt men van een *Theory of Everything* (TOE).

rekening gehouden met de andere theorie. Men kon dit rechtvaardigen door te stellen dat beide theorieën betrekking hadden op twee totaal verschillende takken van de natuurkunde en dus niet per se met elkaar in overeenstemming *hoefden* te zijn. Bovendien definieerde men voor elke theorie een bepaald geldigheidsgebied.

Maar uiteindelijk groeide stilaan het besef dat beiden verenigbaar *moesten* zijn. Bij de beschrijving van zeer snelle en zeer kleine deeltjes moest hun geldigheid blijven bestaan. Een voorbeeld van een overeenkomst tussen beide theorieën is het volgende : in de relativiteitstheorie geldt $E = mc^2$, in de quantummechanica geldt $E = h\nu$, hieruit volgt dat $mc^2 = h\nu$, of equivalent hiermee : $c^2 \div h = \nu \div m$. De constante in het linkerlid is een gigantisch groot getal (ongeveer $14 \cdot 10^{49} \text{ m}^2/(\text{J} \cdot \text{s}^3)$) dat de verhouding weergeeft van de golflengte van een deeltje tot de massa ervan.

Een probleem bij de unificatie was het volgende : als men stelt dat elementaire deeltjes deformeerbaar zijn, dan wil dit zeggen dat een aangebrachte deformatie zich met een eindige snelheid $v \leq c$ door dit deeltje moet voortplanten. Het moet dus bestaan uit een soort elastische substantie die zekere eigenschappen heeft. Echter, als men dit zegt, dan beschouwt men het deeltje als zijnde *niet* meer elementair. Het gevolg is dat als je in de relativiteitstheorie over elementaire deeltjes spreekt, je *moet* aannemen dat dit puntdeeltjes zijn. Dit lijkt niet zo erg, maar er is een addertje onder het gras : in de quantummechanica mag een elementair deeltje *niet exact* gelokaliseerd zijn. Vermits het deeltje ook als golf kan voorgesteld worden, wil dit laatste ook betekenen dat het deeltje een oneindig kleine golflengte moet bezitten en daarvoor is oneindig veel energie vereist.

Deze (toch wel vrij primitieve) overwegingen brengen een paradox aan het licht die duidelijk maakt dat het verenigen van de (speciale) relativiteitstheorie en de quantummechanica niet zonder problemen is voor het beschrijven van de materie in haar meest elementaire bouwstenen.

1.3 Vereniging speciale relativiteitstheorie en quantummechanica

1.3.1 De quantum veldentheorie (eerste poging)

Uit de problemen die in paragraaf 1.2.3 vermeld werden, ontstond omstreeks 1940/1950 een andere manier om tegen elementaire deeltjes aan te kijken : de quantum veldentheorie (QFT³) die zich baseert op gequantiseerde relativistische velden.

In deze nieuwe theorie sprak men van zogenaamde ‘velden’ die een golfstructuur konden bezitten en die in één enkel punten konden gedefinieerd worden. Dankzij het genie dat Richard Feynman is, kon men de gebeurtenissen die een deeltje meemaakt eenvoudig visualiseren (de zogenaamde Feynman-diagrammen). In zijn diagrammen stelde hij de deeltjes voor als puntdeeltjes (al waren het in werkelijkheid energiequanta in een oscillerend veld, de oscillaties vertegenwoordigen de energie). Men kon deze Feynman-diagrammen op diverse manieren ‘lezen’ zodat verschillende processen met hetzelfde Feynman-diagram beschreven konden worden.

Er waren echter sterke bezwaren tegen de theorie, waarbij het allergrootste bezwaar was dat er oneindigheden als resultaten konden optreden. Om dit op te vangen ontwikkelde men de techniek van *renormalisatie*, wat naar mijn normen eigenlijk een verkapte vorm van wiskunde is : gaandeweg in de berekeningen bekeek men de tussenresultaten en herdefinieerde men bepaalde natuurconstanten (dit diende zeer voorzichtig en consistent te gebeuren). Al bij al was er één theorie waar deze techniek uitzonderlijk goed bij werkte, namelijk de quantum elektrodynamica

³Afkomstig uit het Engels : *quantum fieldtheory*.

(QED) die beschrijft hoe een elektron en zijn antideeltje (het positron) met een elektromagnetisch veld interageren.

Renormalisatie was echter onelegant en vaak niet eenduidig. Meer nog, als men de theorie toepaste op het heel kleine afstandsgebied, dan werd ze ongeldig waardoor het een wiskundig inconsistente theorie werd bevonden.

1.3.2 De quantum veldentheorie (tweede poging)

Gedurende de daaropvolgende jaren werden talrijke experimenten met deeltjesversnellers uitgevoerd en ontdekte men dat bij de natuurkrachten er bepaalde deeltjes worden uitgewisseld wanneer deeltjes in andere deeltjes overgaan. In 1954 werkten C.N. Yang en Robert Mills het concept van de zogenaamde Yang-Mills-vectorvelden uit. Deze velden lieten toe dat bijvoorbeeld een proton in een neutron kan veranderen. Al bij al was dit een zeer fraaie manier van werken, maar er was een caveat : protonen zijn elektrisch geladen deeltjes en bij de verandering moet het behoud van lading blijven gelden. Hiertoe werden er zogenaamde Yang-Mills fotonen uitgewisseld tussen het veld en het deeltje in kwestie, wat maakte dat de theorie goed onderbouwd was. Uiteindelijk werd de theorie niet relevant voor de werkelijkheid bevonden (in het geval van het proton dat overgaat in een neutron geldt bijvoorbeeld dat beide deeltjes niet even zwaar zijn en sterker nog, de Yang-Mills fotonen bestonden niet).

Later werd de theorie echter nieuw leven ingeblazen door Sheldon Glasgow, Steven Weinberg en Abdus Salam die het concept van ‘spontane symmetriebreking’ (waar ik verder nog op terugkom) in de Yang-Mills theorie implementeerden. Men sprak van ijktheorieën (*gauge theories*) die veronderstellen dat alle krachtvelden gewoon het resultaat zijn van de natuur die in elk punt van de ruimte de symmetrie trachtte te herstellen. Een rechtstreeks resultaat van hun werk was de unificatie van de elektromagnetische kracht en de zwakke kernkracht wat leidde tot de elektrozwakke kracht, dit leverde hen de Nobelprijs op. Niet onbelangrijk hierbij was het werk van Gerard 't Hooft en Martinus Veltman : zij toonden aan dat alle oneindigheden (ten gevolge van de renormalisatie) tegen elkaar wegvielen. Dertig jaar later mochten ook beide heren de Nobelprijs in ontvangst nemen.

2 Het Standaardmodel

In de elementaire deeltjesfysica spreekt men van het zogenaamde ‘Standaardmodel’ dat alle elementaire deeltjes – die er tot op heden gekend zijn – encapsuleert (uitgezonderd het *Higgs-deeltje* (H^0) en het *graviton* (g) waar ik verderop nog iets over zeg). Vermits het standaardmodel kadert in de quantum veldentheorie weten we dat (paragrafen 1.3.1 en 1.3.2 in het achterhoofd houdend) elke kracht wordt voorgesteld door een veld en dat ze in het bijzonder door krachtdeeltjes (*quanta*) worden overgedragen. De deeltjes zijn eigenlijk concentraties van energie (uit golfpakketjes bestaande energiebundels) in deze krachtvelden. In de volgende paragrafen worden eerst deze deeltjes en hun rol in de vier fundamentele natuurkrachten (ook wel ‘wisselwerkingen’ genoemd) besproken, vervolgens zeg ik iets over de natuurconstanten die in het model voorkomen en tot slot bespreek ik het concept ‘massa’.

2.1 De elementaire deeltjes

Alle elementaire deeltjes worden in bepaalde groepen geklasseerd, we noemen deze groepen families. Zo zijn er twee belangrijke hoofdfamilies, namelijk de *fermionen* en de *bosonen*. Van deze twee families worden de fermionen tot de *krachtvoelende* deeltjes gerekend en de bosonen tot de *krachtdragende* deeltjes. De fundamentele natuurkrachten worden dus door de krachtdragende deeltjes overgebracht (als uitwisseling tussen een krachtvoelend deeltje en het quantum veld in kwestie).

Tabel 1 geeft een overzicht van de krachtvoelende deeltjes, tabel 2 van de krachtdragende deeltjes. Van elk deeltje wordt ook de lading, spin en massa gegeven. De lading wordt uitgedrukt in de eenheidslading van een elektron, de massa wordt uitgedrukt in elektron-volt (vermits volgens paragraaf 1.2.1 energie en massa equivalent zijn).

Merk op dat voor elk deeltje er ook een *anti-deeltje* bestaat, bij dit laatste is de massa dezelfde dan maar de lading tegengesteld aan het eerste (bijvoorbeeld : de tegenhanger van een elektron wordt een *positron* genoemd). Verder hebben deeltjes een eigenschap die men ‘spin’ noemt en kunnen ze langs deze rotatie-as *linksom* of *rechtsom* draaien. Linksdraaiende deeltjes kunnen overgangen maken omdat ze samen doubletten vormen, rechtsdraaiende deeltjes kunnen dit niet (maar kunnen wel – wanneer ze massa hebben – overgaan in linksdraaiende deeltjes).

Symbool	Naam	Lading	Spin	Massa	Beïnvloed door
d	down quark	$-e/3$	$1/2$	10 MeV	γ, W^\pm, Z^0, A, g
u	up quark	$+2e/3$	$1/2$	5 MeV	γ, W^\pm, Z^0, A, g
e	elektron	$-e$	$1/2$	511 keV	γ, W^\pm, Z^0, g
ν_e	neutrino	0	$1/2$	ϵ	W^\pm, Z^0, g
s	strange quark	$-e/3$	$1/2$	250 MeV	γ, W^\pm, Z^0, A, g
c	charm quark	$+2e/3$	$1/2$	1,5 GeV	γ, W^\pm, Z^0, A, g
μ	muon	$-e$	$1/2$	106 MeV	γ, W^\pm, Z^0, g
ν_μ	muon-neutrino	0	$1/2$	ϵ	W^\pm, Z^0, g
b	bottom quark	$-e/3$	$1/2$	4,8 GeV	γ, W^\pm, Z^0, A, g
t	top quark	$+2e/3$	$1/2$	174 GeV	γ, W^\pm, Z^0, A, g
τ	tau	$-e$	$1/2$	1,8 GeV	γ, W^\pm, Z^0, g
ν_τ	tau-neutrino	0	$1/2$	ϵ	W^\pm, Z^0, g

Tabel 1: De krachtvoelende deeltjes (*fermionen*).

Symbool	Naam	Lading	Spin	Massa	Kracht
γ	foton	0	1	0	elektromagnetisme
A	gluon	0	1	0	sterke kernkracht
W^+	W^+ -deeltje	+e	1	80 GeV	zwakke kernkracht
W^-	W^- -deeltje	-e	1	80 GeV	zwakke kernkracht
Z^0	Z^0 -deeltje	0	1	91 GeV	zwakke kernkracht
g	graviton	0	2	0	zwaartekracht

Tabel 2: De krachtdragende deeltjes (*bosonen*).

Belangrijk om in te zien is dat er in tabel 1 drie grote hoofdblokken zijn : deze stemmen overeen met de drie generaties van deeltjes in het Standaardmodel. De eerste generatie bevat de lichtste deeltjes en de twee daarop volgende generaties bevatten steeds zwaardere deeltjes (met als uitspringer de zeer massieve top quark).

Naast de twee bovenvermelde families (fermionen en bosonen) zijn er ook nog de *hadronen* : deze deeltjes zijn samengesteld uit deeltjes van de eerste twee families.

2.1.1 Fermionen

Als we de fermionen beschouwen, dan kunnen deze worden opgesplitst in twee groepen : de *leptonen* en de *quarks* :

leptonen : tot deze familie behoren het *elektron*, het *muon*, het *tau*-deeltje en hun drie neutrale verwanten : de *neutrino*'s. De massa van deze laatste heb ik aangeduid met ϵ om duidelijk te maken dat (1) deze massa nog niet vaststaat en (2) deze massa zo goed als nul wordt verondersteld te zijn.

Quarks : er bestaan 6 soorten quarks⁴ (ook wel smaken van quarks genoemd). In het Nederlands krijgen deze de namen neer (*down*), op (*up*), vreemd (*strange*), tover (*charm*), beneden (*bottom of beauty*) en boven (*top of truth*) (deze laatste quark (boven) werd pas in april 1995 officieel ontdekt omdat hij zo massief is en de ontdekking ervan grote energieën vereist in de deeltjesversnellers !).

Belangrijk om weten is dat quarks nog een extra eigenschap hebben, namelijk *kleur*. Elke quark kan *rood*, *groen* of *blauw* zijn (merk op dat dit uiteraard niets met kleur – in de zin zoals wij dit kennen – te maken heeft, het is gewoon een handige manier om een eigenschap te beschrijven). De logica achter deze redenering is dat quarks enkel in bepaalde combinaties (niet afzonderlijk dus !) mogen voorkomen zodat de ‘totale kleur’ wit is (mengen van die drie kleuren geeft wit).

2.1.2 Bosonen en de vier fundamentele natuurkrachten

De familie van de bosonen vertegenwoordigt de deeltjes die de vier natuurkrachten overdragen. In het Standaardmodel werden met succes al drie van de vier fundamentele natuurkrachten beschreven :

⁴Tussen de jaren 1953 en 1957 ondekte men dat er een ladingsverdeling in de protonen en neutronen kon worden waargenomen. Pas in 1964 postuleerden Murray Gell-Mann en George Zweig het bestaan van quarks (al werd het toen slechts als wiskundige verklaring gezien, nu aanvaardt men het bestaan van quarks als zijnde fysische objecten). De naamgeving is afkomstig uit de regel ‘three quarks for Muster Mark’ in het boek ‘Finnegans Wake’ van James Joyce.

elektromagnetische kracht : in 1873 ontdekte James Clerk Maxwell dat elektriciteit en magnetisme aan elkaar gerelateerd waren en hij unificeerde beiden in de elektromagnetische kracht. Deze kracht is onder andere verantwoordelijk voor de binding van elektronen aan de atoomkern om elektrisch neutrale atomen te vormen. Ook geldt dat atomen zich groeperen voor de vorming van moleculen en kristallen vanwege de elektromagnetische effecten die ontstaan door hun geladen substructuur. Een ander voorbeeld is wrijving : deze wordt veroorzaakt doordat elektromagnetische krachten in de materie de verplaatsing van atomen en elektronen uit hun evenwichtspositie in het materiaal tegenwerken. Het krachtdeeltje dat instaat voor de interactie met het elektromagnetisch veld is het *foton* (γ) en uit tabel 1 kunnen we aflezen dat de neutrino's ongevoelig zijn voor de invloed van fotonen.

Zwakke kernkracht : deze kracht laat toe dat quarks in andere quarks overgaan, of leptonen in andere leptonen. Belangrijk is dat zij verantwoordelijk is voor het vervallen van de zwaardere deeltjes in lichtere deeltjes (cfr. radioactiviteit). Dit laatste vormt de reden waarom alle stabiele materie rondom ons enkel uit elektronen en de lichtste quarks (neer en op) bestaat. Bij de overgang van quarks worden drie krachtdeeltjes gebruikt : de intermediaire W^{\pm} - en Z^0 -vector-bosonen. Opvallend is dat de massa's van alle krachtdeeltjes nul zijn, behalve bij deze laatste drie bosonen. Hun spin is ook gelijk aan 1, waardoor men ze vector-bosonen noemt (spin 0 zijn de scalaire bosonen en spin 2 en hoger zijn de tensor-bosonen). De oorzaken en consequenties hiervan worden in paragraaf 2.3 verder uitgediept. Onthoud ook dat in paragraaf 1.3.2 reeds vermeld werd dat de elektromagnetische kracht en de zwakke kernkracht reeds verenigd werden in hetgeen men de *elektrozwakke kracht* noemt.

Sterke kernkracht : deze kracht is verantwoordelijk voor het bijeenhouden van de quarks om *protonen* en *neutronen* te vormen. Een residueel effect is dat de atoomkern bij elkaar wordt gehouden. De deeltjes die deze kracht overdragen worden de *gluonen*⁵ (A) genoemd. Belangrijk is dat de leptonen geen effect van deze kracht ondervinden.

De quantum veldentheorie voor de sterke kernkracht werd geformuleerd omstreeks 1973 : zij steunde op quarks en gluonen en lijkt op de quantum elektrodynamica (QED). Maar omdat deze kracht enkel de kleur van een quark (en niet de smaak) beschouwt, noemt men deze quantum veldentheorie ook wel de quantum chromodynamica (QCD) (en spreekt men van de 'kleurkracht').

Interessant om weten is dat er negen combinaties van kleur en complementaire kleur zijn. Eén hiervan kan kleurloos gekozen worden en moet dus vrij voorkomen. Dit maakt dat er *acht* verschillende gluonen zijn. Omdat zij een kleurcombinatie dragen, kunnen zij onderling met elkaar interageren (ze zijn dus eigenlijk ook krachtvoelend).

De fundamentele natuurkracht waarvoor nog geen succesvolle quantum veldentheorie werd gevonden is de **zwaartekracht**. Uit de structuur van het Standaardmodel blijkt wel dat indien er zo'n theorie zou bestaan, er dus een overeenkomstig krachtdeeltje dient te zien. Het *graviton* met spin 2 is hier een goede kandidaat voor.

Merk op dat de vier fundamentele natuurkrachten op verschillende schalen werken : het bereik van de zwakke en sterke kernkracht is beperkt tot de afstanden in de atoomkern, daarbuiten hebben ze slechts weinig effect. Voor de sterke kernkracht geldt daarenboven nog eens dat ze sterk *toeneemt* naarmate de afstand tussen de quarks groter wordt, wat maakt dat quarks niet geïsoleerd in de natuur voorkomen. Indien men twee quarks uit elkaar zou trekken dan zullen

⁵Afkomstig uit het Engels : *glue* betekent lijm.

deze uiteindelijk wel van elkaar ‘lossen’ maar uit het vacuum verschijnen direct twee nieuwe quarks (ontstaan doordat we zoveel energie in het systeem steken) die elk een binding aangaan met de twee oorspronkelijke quarks. De zwakke kernkracht is ruim honderdduizend keer zwakker dan de sterke kernkracht.

Belangrijk om te weten is dat het Standaardmodel *geen* unificatie is van de elektromagnetische kracht, zwakke- en sterke kernkracht, maar eerder een *verzameling* van drie gelijkaardige maar aparte theorieën.

2.1.3 Hadronen

Zoals in de vorige paragraaf vermeld, komen quarks niet geïsoleerd in de natuur voor. Zij worden door de sterke kernkracht gebonden door middel van gluonen. Dit geeft aanleiding tot de vorming van de familie van de *hadronen*. De hadronen bestaan uit twee grote groepen, de *baryonen* en de *mesonen* :

baryonen : deze worden opgebouwd met quark-tripletten. Voorbeelden zijn : de *protonen* (twee op en één neer quark wat een lading van $+1e$ geeft), de *neutronen* (twee neer en één op quark wat een lading van 0 geeft), Δ^- (drie neer quarks wat een lading van $-1e$ geeft), Λ^0 (één op quark, één neer quark en één vreemd quark wat een lading van 0 geeft), Σ^+ (twee op quarks en één vreemd quark wat een lading van $+1e$ geeft), Ω^- (drie vreemd quarks wat een lading van $-1e$ geeft), C_1^{++} (één tover quark en twee op quarks wat een lading van $+2e$ geeft), ...

Mesonen : deze worden opgebouwd met quark-doubletten die bestaan uit een quark en een anti-quark. Voorbeelden zijn de *kaonen* (K^+ , K^0 en K^-), de *pionen* (π^+ , π^0 en π^-), het J/ψ -meson⁶, de D^+ , D^0 - en D^- -mesonen, ...

2.2 Natuurconstanten

Naast de ‘gewone’ constanten (zoals de lichtsnelheid, de constante van Planck, ...) bestaan er ook dimensieloze constanten en het is deze laatste soort die het meest interessant is aangezien zij onafhankelijk zijn van de eenheden die we gebruiken. In de algemene relativiteitstheorie en de quantummechanica komen *geen* dimensieloze constanten voor. Dit wil zeggen dat alle dimensieloze constanten voortkomen uit het Standaardmodel en buiten de elementaire deeltjes die erin voorkomen, zijn er ook nog een handvol natuurconstanten.

Er zijn 6 quarks (voor elk van de drie generaties is er een positief en negatief geladen quark). Hun massa’s gedeeld door de Planck-massa ($2 \cdot 10^{-8}$ kg) is dimensieloos. Hetzelfde geldt voor de massieve leptonen, het Higgs-deeltje, de W^\pm - en Z^0 -bosonen. Dit levert al een totaal van $6 + 3 + 1 + 2 = 12$ dimensieloze constanten. Vermits de massa’s van de drie soorten neutrino’s nog niet gekend zijn (denk aan de ϵ die ik gebruikte), komen er nog 3 constanten bij wat in een totaal van $12 + 3 = 15$ resulteert.

Verder zijn er nog twee ‘koppelingsconstanten’ voor de elektrozwakke kracht en de sterke kernkracht, wat dus in totaal $15 + 2 = 17$ constanten oplevert.

De W^\pm -bosonen interageren met quarks op een complexe manier die van een heel aantal parameters (de Kobayashi-Maskawa matrix genoemd) afhangen. Dit vereist een 3×3 matrix wat dus 9

⁶Ook wel ‘gypsy-meson’ genaamd. Dit meson werd door twee verschillende onderzoeksgroepen ontdekt : Burton Richter en zijn groep verkozen de naam ψ -meson terwijl Samuel Ting en zijn groep de naam J -meson verkozen. Uiteindelijk werd besloten beiden te integreren.

coëfficiënten oplevert. Vereenvoudiging leidt uiteindelijk tot 4 constanten wat een totaal resultaat van $16 + 4 = 21$ natuurconstanten in het Standaardmodel oplevert.

We kunnen na deze 21 nog verder gaan : als we de nulenergie-dichtheid in rekening brengen (de zogenaamde kosmologische constante), dan werken we al met 22 constanten. Verder is er nog een parameter in het Standaardmodel die weergeeft hoeveel de sterke kernkracht de pariteit schendt (id est, de symmetrie van het links-rechtsdraaien bij deeltjes). Experimenten wijzen echter uit dat deze parameter nul is, maar als we hem alsnog beschouwen werken we met **23 natuurconstanten**.

Het grote aantal wordt nogal onelegant ervaren en het doel is het zoeken naar een theorie die de berekening van *al* deze constanten mogelijk maakt zodat ze niet meer ‘fundamenteel’ maar ‘afleidbaar’ zijn.

2.3 Massa en de rol van het Higgs-boson

Het Standaardmodel mag dan wel knap in elkaar zitten, er blijft nog steeds (minstens) 1 belangrijke vraag onbeantwoord : hoe ontstaat massa ? De theorie voorspelt hiervoor het bestaan van een extra deeltje : het *Higgs*-boson (H^0).

Sinds enige tijd is er een unificatie van de elektromagnetische kracht en zwakke kernkracht beschikbaar : de elektrozwakke kracht. Bij hoge energieën geldt dat de twee krachten symmetrisch verbonden zijn. Echter, bij lagere energieën (zoals bijvoorbeeld het universum nu is) geldt die symmetrie niet meer : het bereik van de elektromagnetische kracht is oneindig terwijl dat van de zwakke kernkracht beperkt is tot subnucleaire dimensies (kleiner dan 10^{-15} cm). Dit verschil kan verklaard worden door het feit dat fotonen massaloos zijn maar de W^\pm - en Z^0 -bosonen zeer zwaar.

Vanwaar komt nu deze symmetriebreking ? Anders gesteld : vanwaar halen de W^\pm - en Z^0 -bosonen hun zware massa's ? Een oplossing hiervoor kan gevonden worden in het werk van Peter Higgs (rond 1960). Hieruit leidt men af dat alle deeltjes (leptonen en quarks) hun massa van het Higgs-boson krijgen (men spreekt hier van Yukawa-koppelingen). Steven Weinberg vergeleek het Higgs-veld met een oceaan : de breking van de elektrozwakke symmetrie leek op het bevriezen van water, de overgang van vloeibaar naar vast is een fase-overgang en Weinberg postuleerde dat het heelal zelf een fase-overgang onderging wanneer het na de oerknal van hoge naar lagere energie overging. Wat in dit geval ‘bevroor’ was het Higgs-veld en de symmetrie tussen krachten en massa's van elementaire deeltjes.

Theoretisch werk levert dat het Higgs-boson geen spin heeft. Wat de massa ervan betreft, tast men nog steeds in het duister. Men denkt (als de massa relatief klein is) het Higgs-boson binnen enkele jaren experimenteel te kunnen vaststellen in de deeltjesversnellers. Uitgaande van het feit dat men de massa niet kan voorspellen, is men ervan overtuigd dat er nog meer achter de elektrozwakke kracht steekt. Twee mogelijke oplossingen zijn de supersymmetrie (waarbij nieuwe deeltjes met alle gekende fermionen en bosonen worden geassocieerd en verschillende Higgs-bosonen optreden) en dynamische symmetriebreking (hierin is het Higgs-deeltje niet langer elementair maar samengesteld en hopen we de structuur ervan te ontrafelen).

3 Theorieën van Alles

In hun meest elementaire vorm zijn theorieën enkel en alleen maar wiskundige modellen. Het plezierige aspect aan deze modellen is dat men ernaar streeft ze zo eenvoudig mogelijk te maken⁷ (let wel dat dit met een korrel zout dient genomen te worden aangezien ik hier niet beweer dat de quantummechanica – laat staan de supersnaartheorie – eenvoudig is). Achter de meeste huidige theorieën gaat een ongekende wiskundige schoonheid schuil die de mens het gevoel geeft op het juiste pad te zitten.

Het uiteindelijke doel is uiteraard om een theorie te vinden die *alles* kan verklaren, een theorie die verder gaat dan het Standaardmodel en totale unificatie herbergt. Zo'n theorie wordt ook wel een 'GUT' genoemd, afkomstig uit het Engels : *Grand Unifying Theory*.

In de volgende paragrafen wordt telkens kort besproken welke pogingen zoal ondernomen werden om dit tot een goed einde te brengen. Houd evenwel in het achterhoofd dat we daar echter nog niet in geslaagd zijn ! De unificatie van de *algemene* relativiteitstheorie en de quantummechanica baart ons nog serieuze kopzorgen. . .

3.1 Quantumgravitatie

Planck slaagde erin om standaardeenheden af te leiden voor lengte, tijd en massa zodat constanten zoals de lichtsnelheid c en de constante van Planck h gelijk aan 1 zouden zijn. De Planck-lengte die hij afleidde, is van de grootte-orde 10^{-35} m. Als we nu gravitatie bij de quantumveldentheorie proberen te betrekken, dan treedt weer het aspect van renormalisatie op. Ongeacht op welke manier we deze aanpak nu benaderen, het blijkt dat de Planck-lengte de kleinst mogelijke afstand is waarvoor het onzekerheidsprincipe van Heisenberg een zinvolle meting toelaat (in het metrische veld van de zwaartekracht volgens Einstein).

De meest directe manier om quantumgravitatie uit te werken is door aan storingsrekening te doen in de quantumveldentheorie (deze manier van werken leidde tot uitstekende resultaten bij de quantum elektrodynamic). Hiervoor dient men eerst een systeem van massaloze gravitonen met spin 2 te construeren. Vervolgens beschrijft men dan de interacties van deze gravitonen met behulp van storingsrekening. Bij de quantum elektrodynamic werkte deze aanpak nadat men divergerende termen uit de berekeningen schrapt (denk terug aan het concept van renormalisatie). Echter, voor de gravitatie werkt dit niet. Men zegt dat de resulterende quantumveldentheorie niet-renormaliseerbaar is en bijgevolg is het dus niet zomaar mogelijk om een zinnig resultaat te geven.

3.2 Supersymmetrie (SUSY)

Deze manier van werken veronderstelt dat er een zekere symmetrie tussen de fermionen (half-tallige spin) en de bosonen (heeltallige spin) bestaat : een supersymmetrie. Men gaat er vanuit dat alle leptonen, quarks en bosonen aan elkaar gerelateerd zijn. Dit is een fraaie theorie aangezien ze toelaat dat alle elementaire deeltjes verenigd worden (en dus ook de fundamentele natuurkrachten). Het resultaat is wel een verdubbeling van het aantal deeltjes vermits ze nu allen supersymmetrische tegenhangers krijgen (met een andere spin). Men spreekt dan van *sleptonen* en *squarks*, *photino's*, *wino's*, *zino's*, *gluino's*, *gravitino's*, . . . Net zoals bij de elektrozwakke

⁷Einstein beweerde zelfs : '*Alles moet zo eenvoudig mogelijk gemaakt worden, maar niet eenvoudiger*'.

kracht treedt er hier dan ook symmetriebreking op wat dan resulteert in de verschillende fermionen en bosonen. Als deze ‘nieuwe’ deeltjes bestaan, dan zullen ze zeer zwaar moeten zijn (want we hebben ze tot nu toe nog niet gedetecteerd).

Het probleem dat op het einde van paragraaf 3.1 werd gesteld, *leek* met behulp van deze theorie opgelost : een theorie van *supergravitatie* was in de maak, maar na lange berekeningen werd de hoop weer opgegeven. Het rare was dat deze theorie opperbest werkte in 10 dimensies (net zoals de hypothese van Theodora Kaluza en Oscar Klein : zij stelden dat er meer dan 4 dimensies zouden zijn) ! De extra dimensies zouden dan opgerold zijn in een ‘sfeer’ met een omtrek kleiner dan de Planck-lengte.

3.3 Snaartheorie (*string theory*)

De oorspronkelijke snaartheorie (1968) was gedefinieerd in een stelsel van 26 dimensies (volgens Stefano Veneziano en Miguel Virasoro). Men beschouwde haar als de beschrijving van de sterke kernkracht, dit was nog voor de huidige theorie van de quantum chromodynamica (QCD). Ze leed echter onder zekere inconsistenties. Nader onderzoek resulteerde in een theorie die gedefinieerd was voor ‘slechts’ 10 dimensies en supersymmetrisch was. Het symmetrische object is hier de snaar (*string*) : de interpretatie van de theorie leerde ons dat snaren bij lage energieën zich als deeltjes zouden manifesteren en bij hoge energieën als lussen van snaren die op allerlei wijzen kunnen trillen en zo bijvoorbeeld deeltjes van spin twee voorstellen (het gezochte graviton). In 1982 publiceerden Michael Green en John Schwarz een artikel dat de deur opendeed voor het verdere onderzoek naar de snaartheorie.

Later in 1994 maakten Nathan Seiberg en Edward Witten (een brein apart als je ’t mij vraagt, hij is één van de zeer weinig uitverkoren mensen die de snaartheorie echt begrijpen) een doorbraak : met behulp van een speciale verzameling vergelijkingen toonden ze aan dat een bepaalde supersymmetrische veldtheorie elektromagnetische dualiteit vertoonde. Dit laatste wil zeggen dat het bestaan van magnetische monopolen kon aangetoond worden.

Het probleem waar we nu echter mee worstelen is : hoe wordt de supersymmetrie gebroken ? Er zijn duizenden manieren waarop de zes extra dimensies kunnen opgerold worden en elke manier leidt tot een andere vorm van deeltjesfysica. De snaartheorie uitbreidend, is men beginnen denken aan membranen in p dimensies (men spreekt hier van p -membranen) wat leidt tot de M-theorie. Dit nieuwe onderzoeksgebied is echter maar voor zeer weinigen weggelegd en één van de goeroe’s op dit vlak is Edward Witten. Volgens hem staat de M voor magie, mysterie of gewoon membraan, al naargelang je eigen smaak. Deze nieuwere theorie is nu gedefinieerd in 11 dimensies (Murray Gell-Man sprak indertijd de woorden : ‘supergravitatie in 11 dimensie, bwa !’). Echter, de natuurkundigen bestuderen op dit moment nog maar kleine hoekjes van de M-theorie, het grote beeld ontbreekt nog steeds. Velen zijn er wel van overtuigd dat deze theorie een serieuze kanshebber is als GUT.

4 Conclusies

Zoals het Standaardmodel er nu uitziet, lijkt het alsof we op de juiste weg zitten : de deeltjesversnellers geven ons de experimentele bevestiging tussen model en realiteit en de quantum veldentheorie is goed in het leveren van inzichten. Hetgeen ons wel nog onder andere parten speelt is de grote hoeveelheid constanten (vermeld in paragraaf 2.2) en zeker niet te vergeten de rol van de zwaartekracht in dit alles.

4.1 Hogere energieën (kleinere afstanden)

Als ik kijk naar de evolutie die het Standaardmodel doorgemaakt heeft, dan kan ik me niet van de indruk ontdoen dat het einde van de rit nog niet in zicht is. In de (nabije) toekomst hebben we meer en meer de mogelijkheid om botsingen bij nog hogere energieën te bestuderen waarbij we dus onder andere nog dieper in de materie kunnen kijken. Wie weet wat de dan nog zullen ontdekken ? Een veel belangrijker aspect is dan : als we nieuwe dingen ontdekken, in welke mate zullen deze dan gevolg hebben op onze huidige theorieën (in casu het Standaardmodel) ? En wat gebeurt er indien we bij de Planck-lengte (of Planck-energie) aanbellen en condities vergelijkbaar met de oerknal kunnen onderzoeken ? En dan is het nog het niet eens zeker dat we deze hoge energie kunnen bereiken met onze bestaande middelen : de deeltjesversnellers dienen dan zo zwaar gevoed te worden.

4.2 De rol van God

Als we altijd maar op een meer fundamenteeler niveau gaan kijken en ernaar streven dat alle interacties tussen deeltjes volledig verenigd gemodelleerd worden, wat is dan nog de rol van God in dit beeld ? Kunnen we Hem uiteindelijk volledig overboord zetten ? Dergelijke ‘zware’ vragen nopen mij alsnog tot het zoeken naar een antwoord, ook al is dit onder alle omstandigheden moeilijk te geven. In mijn persoonlijk wereldbeeld is er (voor het moment) geen plaats voor God. Vanuit zuiver exact-wetenschappelijk standpunt gezien (een filosofie waar ik mij bij aansluit) is alles uit te drukken in termen van elementaire deeltjes en hun interacties. Indien dit alles in wiskundige termen beschreven kan worden – en vooral verklaard kan worden – dan wordt God volledig naar de achtergrond verschoven. De enige plaats waar Hij zich dan nog kan bevinden is op het terrein van het onbekende : alle religies in beschouwing genomen, aanvaard ik het Godsbestaan enkel nog in de situaties waar de exacte wetenschap geen antwoord weet te geven. Concreet betekent dit voor mij bijvoorbeeld de situaties ten tijde van de oerknal. Het is het absolute begin dat Hij in handen *zou* kunnen hebben indien *wij* er niet in slagen de oplossing te vinden (wat trouwens een typisch menselijk geval van hoogmoed is). Merk op dat ik hier niet spreek over de situaties vóór de oerknal aangezien ‘vóór’ in deze context geen fysische betekenis meer heeft.

4.3 Determinisme (en vrije wil)

Een andere manier van denken is op het vlak van het quantummechanische, namelijk het onzekerheidsprincipe : dit maakt dat God opzij wordt gezet en er een toevalselement wordt geïntroduceerd (een zet waar Einstein het redelijk moeilijk mee had). Ik kan Lagrange en zijn determinisme langs de ene kant wel begrijpen, maar langs de andere kant heeft de quantummechanica zo'n effect op

ons werelddenken dat dit ‘oerbeeld’ van determinisme aan het wankelen wordt gebracht. Persoonlijk geraak ik er niet goed wijs uit, temeer omdat ik de quantummechanica ook semantisch niet ten volle begrijp (wat volgens Feynman toch niet zo erg is, niemand begrijpt volgens hem immers volledig de quantummechanica). Hebben wij vrije wil ? Ligt ons handelen ergens op fundamenteel niveau vast ? . . . ik geraak er niet uit, van zodra ik argumenten voor het ene uiterste vind, ontdek ik er direct een aantal andere voor het andere uiterste. Niettemin blijft het boeiende stof tot nadenken.

4.4 Reductionisme en complexiteit

In de inleiding sprak ik reeds over reductionisme : alles is te herleiden tot de meest fundamentele bouwstenen en hun interacties. Volgens mij zijn alle natuurverschijnselen te ontleden, op steeds fundamenteler niveau tot we bij de elementaire deeltjes aankomen. De omgekeerde weg is *theoretisch wel* maar (helaas) *praktisch niet* mogelijk : het wordt veel te complex om de veel-deeltjes systemen in hun geheelheid te beschouwen, uitgaande van de individuele interacties. Het verklaren waarom de kleur van mijn hoofdhaar zwart is, is bijgevolg een onbegonnen, veel te complex werk. Vroeger was ik zeer scherp in mijn oordeel over andere wetenschappen : *enkel* de natuurkunde verdient het hoogste lof want zij is de meest fundamentele wetenschap. De laatste jaren heb ik mijn visie echter grondig bijgesteld om te kunnen omgaan met de zojuist vermelde toenemende complexiteit : de andere wetenschappen zijn *nodig*, zij leveren een unieke vorm van simplificatie op die het werken in de alledaagse wereld eenvoudiger en efficiënter maakt. *Let wel, ik vind nog steeds dat de natuurkunde de meest fundamentele wetenschap is !*

4.5 Conclusie

‘Leidt het Standaardmodel in de elementaire deeltjesfysica tot een quantum veldentheorie van Alles ?’

Het *correcte* antwoord op deze vraag, dien ik U schuldig te blijven. Mijn *vermoeden* is echter dat we langs de ene kant op de goede weg zitten en de tijd raad zal brengen. Misschien slagen we er alsnog in grote hoeveelheden energie in onze deeltjesversnellers te proppen en zo een glimp van de allerzwaarste deeltjes op te vangen. Misschien ontdekken we op deze manier de supersymmetrie die aan de basis van alles lijkt te liggen. Langs de andere kant echter, denk ik dat de uiteindelijke theorie misschien zo ingewikkeld zal zijn (ondanks het menselijk streven naar ‘esthetisch verantwoorde’ wiskunde) dat slechts enkele gelukkigen op deze aardbol zich haar eigen kunnen maken (moest dat als mens al mogelijk zijn). Dit is een zeer spijtige zaak, maar ik ben ervan overtuigd dat de overheid en de industrie wel gepaste technologieën zal ontwikkelen waar al deze ‘nieuwe kennis’ in kan toegepast worden. . .

Bibliografie

- [Bae94a] John Baez. *How Many Fundamental Constants Are There ?* University of California, Riverside, 1994. Webextract.
- [Bae94b] John Baez. *Renormalization Made Easy*. University of California, Riverside, augustus 1994. Webextract.
- [BBTT93] Mary Butterworth, Ian Butterworth, Doris Teplitz, en Vigdor Teplitz. *How Particles Acquire Mass*. Imperial College London, Southern Methodist University (Dallas, Texas), 1993. Webextract.
- [Bla95] Herbert Blankesteijn. *Vreemd en moeilijk*. Webextract, 1995.
- [CG98] W.N. Cottingham en D.A. Greenwood. The Construction of the Standard Model. Uit *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. Cambridge University Press, 1998.
- [CUP98] Cambridge University Press. *Physicist's view of nature*, 1998. Webextract.
- [CW99] R.S. Chivukula en J. Womersley. *Technicolor : Dynamical Electroweak Symmetry Breaking*. Particle Data Group, oktober 1999. Webextract.
- [Dec00] Alex Deckmyn. *Suiker en elementaire deeltjes*. Katholieke Universiteit Leuven, 2000. Webextract.
- [Die99] Tom Diehl. *How strong is the strong force ?* Fermilab, januari 1999. Webextract.
- [Duf97] Michael J. Duff. The Theory Formerly Known as Strings. *Scientific American*, 1997. Webextract.
- [Fer97] Fermilab. *The Standard Model of Elementary Particles*, januari 1997. Webextract.
- [Gib96a] Phil Gibbs. Causality. *The Cyclotron Notebooks*, mei 1996.
- [Gib96b] Phil Gibbs. Is Space-Time Discrete ? *The Cyclotron Notebooks*, mei 1996.
- [Gib96c] Phil Gibbs. Quantum Gravity. *The Cyclotron Notebooks*, mei 1996.
- [Gib96d] Phil Gibbs. The Superstring Mystery. *The Cyclotron Notebooks*, mei 1996.
- [Gib96e] Phil Gibbs. Theory of Theories. *The Cyclotron Notebooks*, mei 1996.
- [Gro97] D.E. Groom. *Magnetic Monopole Searches*. Particle Data Group, december 1997. Webextract.
- [Hew89] Paul G. Hewitt. *Conceptual Physics*. Harper Collins, 6e editie, 1989.
- [HH99] K. Hagiwara en K. Hikasa. *Searches for Quark and Lepton Compositeness*. Particle Data Group, 1999. Webextract.
- [HS99] Howard E. Haber en M. Schmitt. *Supersymmetric Particle Searches*. Particle Data Group, oktober 1999. Webextract.
- [Laf96] Susan Lafo, editor. *The History of Particle Physics*. Mountain Empire High School, 1996. Webextract.

- [LL97] Tony M. Liss en Paul T. Lipton. The Discovery of the Top Quark. *Scientific American*, september 1997. Webextract.
- [Ove90] Dennis Overbye. *Kinderen van Hubble*. De Haan, 1990.
- [Pir95] Francisco Pires. What exactly is the Higgs boson ? *Scientific American*, 1995. Webextract.
- [Pre00] Paul Preuss. Unseen Dimensions Could Explain Weakness of Gravity. *Daily University Science News*, maart 2000. Webextract.
- [Sch96] D. Schryvers. *Algemene natuurkunde*. RUCA - Universitair Centrum Antwerpen, 1996.
- [tH00] Gerard 't Hooft. *Introduction to General Relativity*. Universiteit Utrecht, oktober 2000.
- [tHVdW97] Gerard 't Hooft, M.J.G. Veltman, en H.Q.P.J. de Wit. *Lie-groepen in de fysica*. Universiteit Utrecht, 1997.
- [Tim00] Peter Timmerman. *Explosieve wiskunde, groene kikkers en wilde ideeën*. UT-nieuws, maart 2000. Webextract.
- [vB94] Pierre van Baal. In afwachting van het zesde quark. *Natuurkundige voordrachten*, (72):85–99, 1994. Instituut-Lorentz, Universiteit Leiden.
- [vB00] Pierre van Baal. *Inleiding in de speciale relativiteitstheorie*. Instituut-Lorentz, Universiteit Leiden, 2000.
- [VK99] H.J. Vermeer en J. Kloosterman. *'t Hoofd breken over kleinste deeltjes*. Universiteit Utrecht, december 1999. Webextract.