



Universiteit
Leiden
The Netherlands

A flavour of family symmetries in a family of flavour models

Adelhart Toorop, R. de

Citation

Adelhart Toorop, R. de. (2012, February 21). *A flavour of family symmetries in a family of flavour models*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/18506>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/18506>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

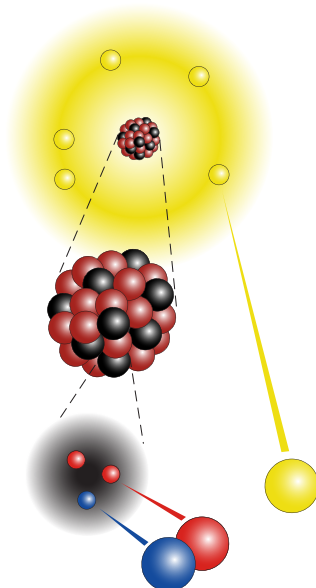
Lieve hart mijn boek is af, mijn boek is af!

Multatuli, 1859
en

In memoriam *Sjoerd Hardeman [166], proefschrift 2011*

Twee vragen die de mens van oorsprong heeft beziggehouden zijn 'Waar is dat van gemaakt?' en 'Zit daar structuur in?'. Als die vragen beantwoord zijn, volgen vaak nieuwe vragen van het type 'Is daar een reden voor?' en 'Kan ik dat verklaren vanuit een onderliggend principe?'

Sinds ongeveer een eeuw hebben we een redelijk beeld van de bouwstoffen van alledaagse materie. Materie komt in veel verschijningsvormen; zo lijken lucht, water, stenen en gras niet echt veel op elkaar. Als je maar diep genoeg inzoomt, blijken ze echter toch allemaal dezelfde bouwstoffen te hebben. Uiteindelijk is alles opgebouwd uit atomen, die op hun beurt weer uit een kern en een aantal elektronen bestaan, zoals weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Materie is opgebouwd uit atomen. Een atoom heeft een electronenwolk (geel) en een kern. In de kern zitten protonen (zwart) en neutronen (donkerrood), die op hun beurt weer uit zogeheten quarks (rood en blauw) bestaat [Schematische voorstelling – niet op schaal].

Elektronen lijken elementaire deeltjes te zijn: hoe hard je ook je best doet, je kunt ze niet splitsen

in kleinere bouwstenen. Dat blijkt niet zo te zijn voor de atoomkern die in veel gevallen gesplitst kan worden, bijvoorbeeld in een kernreactor. Een atoomkern blijkt opgebouwd uit protonen en neutronen, waarin op hun beurt weer zogeheten up en down quarks¹ blijken te zitten, altijd drie in totaal. Daarnaast blijkt er nog een deeltje, het neutrino, te bestaan, dat zich in zekere zin verhoudt tot het elektron zoals het up en down quark zich tot elkaar verhouden.

Deze beschrijving beantwoordt de eerste twee vragen. Alles is gemaakt uit de vier deeltjes elektron, neutrino, up quark en down quark en het feit dat dit voor alle materie geldt en dat er numerieke relaties zijn tussen de aantallen van verschillende deeltjes in een atoom, geeft aan dat er structuur in zit. Het antwoord op de vraag of dit deze via een onderliggend principe verklaard kunnen worden, moest wachten tot de jaren '60 van de vorige eeuw. Toen is het standaardmodel van de deeltjesfysica opgesteld, waarin gesteld wordt dat er een diepe relatie is tussen materie, krachten en een tak van wiskunde genaamd groepentheorie.

De vraag waarom er drie quarks in een proton of neutron zitten, wordt bijvoorbeeld beantwoord door te stellen dat quarks een extra eigenschap 'kleur' hebben en dat alleen kleurneutrale of 'witte' objecten stabiel kunnen zijn. Zoals wit licht verkregen kan worden door rood, groen en blauw licht te mengen, kan een kleurneutraal proton of neutron gevormd worden uit drie quarks, elk met één van de kleuren. De details volgen bij het bestuderen van de $SU(3)$ -groepentheorie van kwantumchromodynamica, de theorie van de sterke kernkracht

Daarnaast wordt het feit dat het elektron en het neutrino alsmede het up en down quark als paren voorkomen, verklaard als een eigenschap van de $SU(2)$ -groepentheorie van de zwakke kernkracht, die ook zorgt voor radioactief verval.

Bovenstaande is een algemene beschrijving van de elementaire-deeltjesfysica zoals we die nu kennen. Het daadwerkelijke onderwerp van dit proefschrift komt naar voren in de waarneming dat weliswaar alle *stabiele* materie uit de vier bovenstaande deeltjes bestaat, maar dat er daarnaast twee 'broertjes' lijken te bestaan voor elk van deze deeltjes. Het up quark lijkt op zijn broertjes charm en top die beiden ook weer in drie 'kleuren' voorkomen; het down quark wordt vergezeld door quarks met de namen strange en bottom en naast het elektron bestaan er een muon en een tau lepton en er zijn ook in totaal drie neutrinos. Dit is nog eens samengevat in figuur 2. De enige eigenschap waarin de broertjes (meestal aangeduid als tweede en derde familie) verschillen van de stabiele-materie deeltjes (de eerste familie) is hun massa.

u up quark	c charm quark	t top quark
d down quark	s strange quark	b bottom quark
e electron	μ muon	τ tau lepton
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Figuur 2: De materiedeeltjes die samen het standaardmodel vormen.

De vraag of er structuur in de families van deeltjes in het standaardmodel zit, wordt duidelijk beantwoord door figuur 2. De vraag of daar ook een onderliggende reden achter zit, is echter

¹We gebruiken hier de Engelse namen voor de quarks. Nederlandse namen bestaan: op-, neer-, vreemde, tover-, bodem- en top-quark in volgorde van toenemende massa, maar deze zijn zeer ongebruikelijk.

nog open. In de traditionele theorie wordt deze vraag met ‘nee’ beantwoord. Het bestaan van drie families wordt als een experimenteel feit gezien, maar niet verklaard.

De fundamentele stellingname van dit proefschrift is dat dit onbevredigend is, en er een onderliggende reden moet zijn achter het bestaan van de drie families. Een hint naar de oplossing is hierboven al gegeven, toen gevonden werd dat de groepentheorie van de kernkrachten uit wees dat deeltjes soms in paren (up en down quark; elektron en neutrino) of in drievoud (rood, groen en blauw quark) voorkomen. Wellicht kan hetzelfde principe gelden voor de drie families. Als er een kracht – of, meer algemeen, een symmetriegroep – bestaat tussen de drie families, kan de groepentheorie hiervan *verklaren* dat ieder van de stabiele-materie deeltjes twee zwaardere broertjes heeft.

Een familiesymmetrie kan dus de gelijkheid tussen de drie families verklaren. Zoals boven aangegeven, lijken de deeltjes in de drie families inderdaad heel erg op elkaar, maar verschillen ze ook op een belangrijk punt: in hun massa. Nu is het interessante dat ook in die massa’s weer structuren lijken te zitten. Zo zijn de deeltjes van de derde familie typisch ongeveer 100x zwaarder dan die van de tweede familie, die op hun beurt weer zo’n 100x zwaarder zijn dan de deeltjes van de eerste familie². In de theorie van Froggatt en Nielsen, beschreven in sectie 2.3.1, kan de massahierarchie inderdaad verklaard worden middels een familiesymmetrie.

Hier blijft het niet bij. Het geoefend oog van de theoretisch natuurkundige denkt méér patronen te kunnen waarnemen. Één hiervan is gerelateerd aan de ‘menging’ van neutrinos. Aangezien er drie neutrinos zijn, kunnen we drie massa’s toeschrijven aan de neutrinos. Maar in bepaalde interacties, blijken het niet precies de toestanden met een zekere massa (‘massa-eigentoestanden’) te zijn die reageren, maar bepaalde combinaties daarvan (‘interactie-eigentoestanden’) – en wel heel specifieke combinaties. Zo is één van de massa-eigentoestanden voor zover we kunnen meten een precies gelijke combinatie van elk van de drie interactie-eigentoestanden en is een andere massa-eigentoestand een gelijke combinatie van twee van de drie interactie-eigentoestanden en bijna niks van de derde. Dit heet tri-bi-maximale mixing in de deeltjesfysicaliteratuur en sinds enige jaren zijn er modellen die het vanuit onderliggende principes kunnen reproducere, mits er een familiesymmetrie gebruikt mag worden. Een voorbeeld wordt gegeven in sectie 2.4.

De kern van dit proefschrift – de hoofdstukken 3 tot en met 5 – zijn in zekere zin allemaal geïnspireerd door het onderstreepte woordje bijna in de vorige alinea. Sinds de zomer van 2011 is er duidelijk experimenteel bewijs dat tri-bi-maximale mixing niet perfect kan zijn. Moeten familiesymmetrieën hiermee verworpen worden, of kunnen ze op een simpele manier aangepast worden?

Hoofdstuk 3 begint met een schets van een aantal mogelijke richtingen in de ruimte van theorieën waar deze waarneming naar kan wijzen. In de rest van het hoofdstuk bekijken we de groepentheoretische achtergrond van tri-bi-maximale mixing en de wiskundige groep die dit mogelijk maakt. We zien dat dit principe te generaliseren is en vinden een groot – maar eindig – aantal andere mixingspatronen die door de wiskunde naar voren worden geschoven. Een aantal hiervan komt heel erg dicht bij de meest recente data en ze hebben met elkaar gemeen dat ze op een natuurlijke manier een inmenging vinden van de derde interactie-eigentoestand in de massa-eigentoestand die voornamelijk uit gelijke delen van de andere twee bestaat, $\theta_{13}^l \neq 0$ in formules.

In hoofdstuk 4 gooien we het over een andere boeg en construeren een vrij uitgebreid – volgens critici wellicht barok – model. Dit model bevat naast een familiesymmetrie ook een zogeheten *grand unified* symmetrie. Deze unificeert de bekende krachten van het standaardmodel en vereenvoudigt daarnaast de beschrijving van de elementaire deeltjes. We kiezen er opzettelijk voor om de menging van zowel neutrinos als quarks in eerste benadering niet heel erg goed te laten overeenstemmen met de data. We kunnen dan een tweede-benaderingsschema invoeren waarin in één klap beide de data een stuk beter beschrijven en bovendien $\theta_{13}^l \neq 0$ gegenereerd wordt.

De kern van de argumentatie van het hoofdstuk ligt in de onverwachte complicaties die het com-

²De constante waarde 100 is lichtelijk overgesimpliceerd. In werkelijkheid verschilt de factor per deeltjestype. Zie sectie 4.2 voor een meer gedetailleerde beschrijving.

bineren van *grand unified* en familiesymmetrie geven. Hoewel de combinatie van de twee symmetriën vanuit esthetisch oogpunt zeer wenselijk is – beide staan een compactere formulering van de theorie toe – blijkt het aantal benodigde hulpvelden onverwacht sterk toe te nemen. Daarnaast blijkt dat voorspellingen gedaan op een zekere hoge energieschaal zich minder makkelijk laten vertalen naar een lagere energieschaal dan naïef wellicht verwacht zou kunnen worden³. Met de toepassing van de juiste methoden kan het model toch op beide schalen geëvalueerd worden.

In hoofdstuk 5 beschouwen we juist modellen waar de energieschaal van de familiesymmetrie vrij laag is. Familiesymmetrie manifesteert zich in deze modellen op dezelfde schaal als de zwakke kernkracht waarnaar hierboven al gerefereerd is. De Large Hadron Collider (LHC) deeltjesversneller van CERN bij Genève is specifiek gebouwd om de geheimen van de zwakke kernkracht beter te doorgronden. Als de schaal van familiesymmetrie inderdaad dezelfde is als die van de zwakke kernkracht, zal de LHC ook voor familiesymmetriën een boel waarnemingen kunnen doen. We beschouwen de voorspellingen van deze modellen voor de LHC en laten zien dat via precisiewaarnemingen van eerdere, minder energierijke versnellers veel modellen al sterk beperkt kunnen worden. Een bijkomend voordeel van deze set-up is dat deze modellen typisch θ_{13}^l ongelijk aan 0 hebben, zij het zonder een specifieke waarde te voorspellen.

Hoofdstuk 6 presenteert de conclusies van dit proefschrift. Geïnspireerd op de oorspronkelijke titel van één van de artikelen kan deze op een *the beauty* en een *the beast* manier gelezen worden. De goede boodschap is dat het veld van familiesymmetriën erg veelzijdig is en dat veel interessante modellen opgesteld kunnen worden. De slechte boodschap is dat de structuur die familiemodellen inspireert, misschien toch minder overtuigend is dan eerst gedacht werd, zeker nu een waarde voor θ_{13}^l ongelijk aan 0 gevonden is. Wellicht is de structuur dan onvoldoende om de gecompliceerdheid van de modellen te rechtvaardigen.

In ieder geval kunnen we stellen dat de elementaire-deeltjesfysica de vraag ‘Waar is dat van gemaakt?’ beantwoord denkt te hebben. De vraag ‘Zit daar structuur in?’ wordt sowieso bevestigend beantwoord, maar de hoeveelheid structuur is nog onderwerp van debat. Aan de hand daarvan zijn er veel antwoorden mogelijk voor de vragen ‘Is daar een reden voor?’ en ‘Kan ik dat verklaren vanuit een onderliggend principe?’ En zodra er nieuwe antwoorden komen op de *eerste* vraag – bijvoorbeeld als de LHC nieuwe, onverwachte deeltjes vindt – kunnen alle kaarten weer anders liggen.

³De waarde van veel observabelen in de hoge-energiefysica blijkt van de energieschaal afhankelijk te zijn waarop een waarnemer er naar kijkt. Intuïtief kan dit als volgt verklaard worden: waarnemen vindt meestal plaats door een lichtdeeltje (foton) op een object af te schieten en te kijken hoe het terug komt. Als dit een energierijker foton is, kan het dieper in het object doordringen en ziet het dus iets anders dan een energiearmere foton, dat minder diep door dringt.