

Hoe quarks hun entree maakten in ons wereldbeeld via kosmische stralen en protonversnellers deel 2

Van quarks als statische bouwstenen tot de dynamische
theorie van quarks en gluonen

Zestig jaar geleden introduceerde Murray Gell-Mann, met opvallend veel slagen om de arm, een nieuwe fundamentele laag in de structuur der materie. De bijbehorende deeltjes doopte hij quarks, een naam ontleend aan de psychedelische woordenvloed van de roman *Finnegans Wake* van James Joyce. Onafhankelijk en gelijktijdig kwam George Zweig tot vergelijkbare ideeën. We schetsen de omstandigheden die tot de introductie van quarks leidden. In het eerste deel van dit tweeluik bespraken we de introductie van twee nieuwe grootheden om de nieuw ontdekte hadronen te ordenen. Hier laten we zien hoe deze ordening aanleiding was voor de introductie van een onderliggende structuur: quarks, en vervolgens tot de ontwikkeling van een complete veldentheorie van quarks en gluonen leidde. De klassificatie van hadronen in termen van quarks die voorkwamen in drie ‘smaken’ was aanvankelijk zeer succesvol, maar bleek geen volledig beeld te geven. De ontdekking van diep-inelastische verstrooiing van elektronen aan quarks identificeerde quarks als reële fysische objecten. De ontdekking van meer quarks dan de drie waarop het oorspronkelijke statische quarkmodel was gebaseerd leidde tot de ontwikkeling van een ijktheorie van ‘gekleurde’ quarks en gluonen.

Meer nieuwe deeltjes: ordening in multipletten – een nieuwe symmetrie

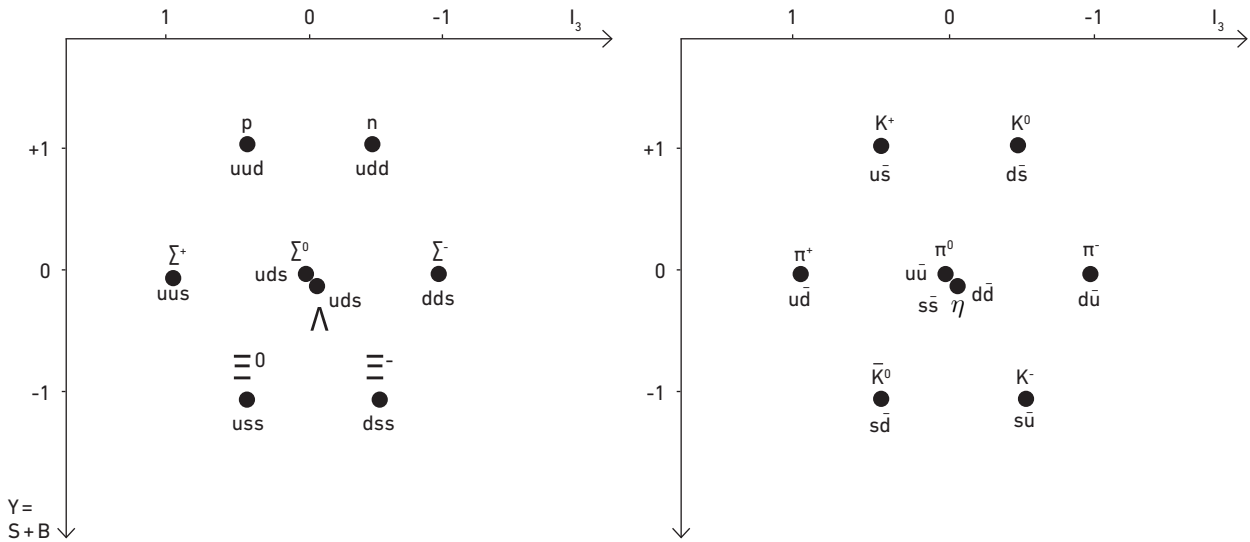
Waarneming met behulp van fotografische emulsies en nevelvaten van kosmische stralen en deeltjes die geproduceerd werden in botsingen in de hoge atmosfeer leidde tot de ontdekking van nieuwe deeltjes die ‘sterk’ wisselwerkten. Aangevuld met de resultaten van de protonversnellers die vanaf begin jaren vijftig van de twintigste eeuw in bedrijf kwamen, zoals het eerder genoemde synchrocyclotron van de universiteit van Chicago, vertoonden deze deeltjes een ordening in isospinmultipletten en, als ook ‘vreemdheid’ werd meegenomen, supermultipletten. We illustreren dit in figuur 1 waar de octetten van baryonen en mesonen zijn weergegeven. In 1961 publiceerde Gell-Mann naar aanleiding van de waargenomen octetten *the eightfold way* [1] (een naam verwijzend naar het edele achtvoudige pad naar verlichting van het boeddhisme). Onafhankelijk kwam Yuval Ne’eman tot een vergelijkbare analyse [2]. Het idee was eenvoudig: zoals isospinmultipletten invariantie aangeven van de sterke wisselwerking onder isospinrotaties (voor te stellen als matrices behorend tot de groep $SU(2)$), zo impliceren de waargenomen supermultipletten invariantie van de sterke wisselwerkingen onder isospin-/vreemdheidrotaties voor te stellen als matrices behorend tot de groep $SU(3)$. Iets zorgvuldiger geformuleerd: isospinmultipletten komen overeen met irreducible representaties van $SU(2)$; isospin/vreemdheid-supermultipletten komen overeen met irreducible representaties van $SU(3)$ [3]. Aanvankelijk was er geen duidelijke reden om te kiezen voor $SU(3)$, maar die reden kennen we inmiddels wel. In *the eightfold way* werd voorbijgegaan aan de eenvoudigste, namelijk de driedimensionale representatie van $SU(3)$. De reden hiervoor citeren we hier: de jonge Nijmeegse hoogleraar De Swart schreef in 1963 [4], een jaar vóór de introductie van quarks: “The lowest nontrivial IR in the octet model, which is physically possible (i.e., has integer quantum numbers for the hyper-

charge), is the IR {8}.” (IR staat voor *irreducible representation*. Hypercharge kan gelezen worden als baryongetal of elektrische lading.) In zijn veel geciteerde artikel naar aanleiding van de octetclassificatie van Gell-Mann en Ne’eman mist hij daarmee de kans op een grote ontdekking, die besloten lag in het serieus nemen van de ‘onmogelijke’ driedimensionale representaties. Dit is precies wat Gell-Mann [5] en onafhankelijk vrijwel gelijktijdig Zweig [6] deden. Zo postuleerden zij een nieuwe laag in de structuur der materie bestaande uit drie deeltjes met ‘fractionele’ lading en fractioneel baryongetal. Zweig noemde deze deeltjes *aces* en Gell-Mann quarks, de naam die beklifde. Quarks waren bij hun introductie en ook in de jaren daarna zeer controversieel. Zweig kreeg zijn manuscript niet gepubliceerd, het is altijd bij een CERN-preprint gebleven. En Gell-Mann hield in zijn publicatie heel veel slagen om de arm. Hij schrijft aan het eind van zijn artikel: “It is fun to speculate about the way quarks would behave if they were physical particles of finite mass (instead of purely mathematical entities as they would be in the limit of infinite mass)”. Vervolgens beredeneert hij dat de lichtste quark stabiel moet zijn en misschien in de aardkorst aangetroffen kan worden. De laatste zin van het artikel, dat overigens maar twee pagina’s lang is, bevat een ‘disclaimer’, een soort excuus voor het te berde brengen van quarks: “A search for stable quarks of charge $-1/3$ or $+2/3$... at the highest energy accelerators would help to reassure us of the **non-existence** of real quarks” (nadruk toegevoegd). In figuur 2 illustreren we hoe uit de fundamentele triplets (de quarks) mesonen en baryonen kunnen worden opgebouwd.

Quarks als ‘statische’ bouwstenen versus quarks als dynamische deeltjes

De beschrijving van hadronen als opgebouwd uit drie quarks (baryonen) of quark-antiquarkparen (mesonen) is goed in overeenstemming met de waarnemingen. De quarks zoals ze volgen uit de modellen van Gell-Mann en Zweig komen voor in drie ‘smaken’: u (up), d (down),

TERUG IN DE TIJD



Figuur 1. Octet van spin-1/2-baryonen en van spin-0-mesonen. De samenstelling uit quarks (zie verderop in de tekst) is ook aangegeven.

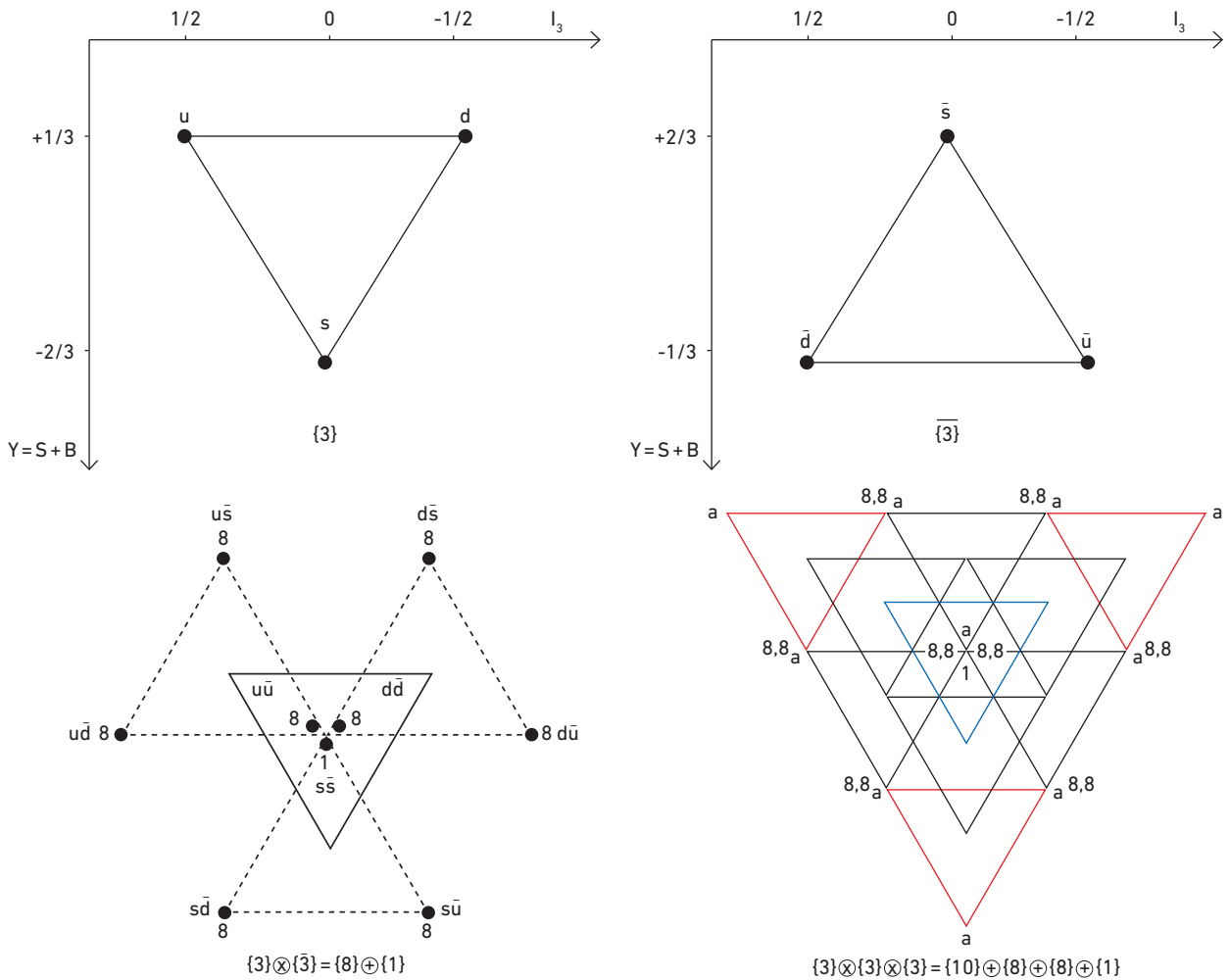
s (strange), ook wel SU(3) van smaak (SU(3) of flavor) genoemd. De symmetrie onder rotaties in de ruimte opgespannen door (u,d,s) is niet perfect omdat de deeltjes binnen de diverse (super)multipletten niet geheel gelijke massa's hebben, maar afgezien daarvan pasten de waargenomen hadronen heel mooi in het schema. In het baryondecuplet ontbrak aanvankelijk een deeltje. De ontdekking ervan, het Ω -baryon, bestaande uit drie s-quarks, was een spectaculaire bevestiging van het quarkmodel.

Toch was het quarkmodel niet bevredigend. Het Ω -baryon bijvoorbeeld heeft spin 3/2 en is daarom opgebouwd uit drie s-quarks met de spins parallel. Volgens het Pauli-principe is dit echter verboden, omdat een toestand van meerdere fermionen antisymmetrisch moet zijn onder verwisseling van twee fermionen.

Verder lukte het niet een veldentheorie te construeren volgens de principes van lokale ijk-invariantie (onder SU(3)-transformaties van 'smaak') zoals door Yang en Mills uiteengezet in een visionair artikel uit 1954. Dat lukte pas in 1973. Dezelfde Gell-Mann publiceerde samen met Fritzsche en Leutwyler de theorie van quarks en gluonen die nu bekend is onder de naam QCD (quantumchromodynamica) [7]. QCD is invariant onder lokale SU(3)-ijktransformaties van een fundamenteel triplet niet van 'smaak' maar van 'kleur': elke quark kan een van drie 'kleurladingen' dragen. In 1966 werd in Menlo Park in Californië de twee milj lange lineaire elektronversneller van het Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in bedrijf genomen die elektronen kon versnellen tot een energie van 20 GeV. Experimenten die elektron-protonverstrooiing bestudeerden in dit nieuwe energiedomein toonden verrassende resultaten. In de jaren vijftig van de vorige eeuw had Robert Hofstadter elektronbundels met een energie van enkele honderden MeV's gebruikt, onder meer om aan te tonen dat protonen geen puntdeeltjes waren. De metingen wezen uit dat

de verstrooiing plaatsvond aan een ladingsbolletje met een straal van ongeveer 1 fm (10^{-15} m). In 1969 werden de eerste resultaten van SLAC bij veel hogere energie gepubliceerd [8]. De verstrooiing bleek niet uitsluitend plaats te vinden aan een diffuus ladingsbolletje. Er werden ook 'events' waargenomen waarbij de elektronen onder een grote hoek verstrooid werden en de impulsoverdracht die daarmee gepaard ging, duidde op verstrooiing aan een object dat veel kleiner was dan het proton. Dit markeerde het begin van de beschrijving van het proton (en hadronen meer in het algemeen) als een dynamisch systeem van gebonden quarks, antiquarks en gluonen gehoorzamen aan de wetten van QCD. Op korte afstand, veel kleiner dan het proton, is de koppelingsconstante klein (asymptotic freedom) zodat kwantitatieve berekeningen mogelijk zijn. Op grotere afstand echter neemt de koppelingsconstante toe en leidt tot opsluiting van quarks in hadronen (confinement), een mechanisme dat nog niet in detail begrepen is. Voor een artikel over de ontwikkeling van QCD door een van de hoofdrolspelers verwijzen we graag naar [9].

De drie quarks die ten grondslag lagen aan het oorspronkelijke quarkmodel bleken overigens niet de enige die in de natuur voorkomen. Het valt buiten het bestek van dit artikel maar er werden nog drie 'quarksmaken' ontdekt, charm (c), beauty (b) en top (t). De ontdekking van charmquarks als bouwstenen van het J/ψ -deeltje in 1974 bevestigde, mocht daar nog twijfel over hebben bestaan, het fysische karakter van quarks als tastbare deeltjes. De ontdekking van b en t volgde in 1977 respectievelijk 1995. Er zijn redenen om aan te nemen dat met u,d,c,s,t,b het beeld compleet is. Alle zes quarks passen overigens kwantitatief in QCD. Ze vertonen aanzienlijke massaverschillen die nog onbegrepen zijn. Hiermee besluiten we de geschiedenis van de introductie van quarks in ons wereldbeeld. Ze zijn inmiddels gevestigde ingrediënten van het standaardmodel. Voor een be-



Figuur 2. Triplets van quarks en antiquarks. Linksonder: octet 8 en singlet 1 van quark-antiquarkcombinaties, mesonen. Rechtsonder: een illustratie van de representaties die geconstrueerd kunnen worden door drie quarks te combineren: een decuplet (a), twee octetten (8), een singlet (1).

schrijving van de huidige stand van zaken en voor een blik op de verdere toekomst, mogelijk ‘voorbij het standaardmodel’, verwijzen we graag naar enkele recente artikelen in dit tijdschrift [10,11].

Dankwoord

Ik dank Karel Gaemers voor een aantal discussies over eerdere versies van dit artikel, die van grote invloed zijn geweest op de uiteindelijke inhoud ervan. Ook dank ik Piet Peters en Henk Tiecke voor het kritisch doorlezen van dit artikel.

Jos Engelen is emeritus hoogleraar hoge-energiefysica van de Universiteit van Amsterdam/Nikhef. Hij was betrokken bij het wetenschappelijke programma van CERN en DESY en bij de beginfase van Antares (astrodeeltjesfysica). Hij bekleedde onder andere het directoraat van Nikhef, het wetenschappelijke directoraat van CERN en het voorzitterschap van NWO. engelen@nikhef.nl

REFERENTIES

- 1 M. Gell Mann, *The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry*, California Institute of Technology, Report CTSL-20 (1961).
- 2 Y. Ne’eman, *Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance*, *Nuclear Physics* **26** 222 - 229 (1961).
- 3 De groep van unitaire 3×3 matrices met determinant 1.
- 4 J.J. de Swart, *The Octet model and its Clebsch-Gordan coefficients*, *Rev.Mod.Phys.* **35**, 916 - 939 (1963), *Rev.Mod.Phys.* **37**, 326 - 326 (1965) (erratum).
- 5 M. Gell-Mann, *A Schematic Model of Baryons and Mesons*, *Phys.Lett.* **8** 214 - 215 (1964).
- 6 G. Zweig, *An $SU(3)$ Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking*, CERN preprint 8419/TH.412 (21 February 1964).
- 7 H. Fritzsch et al., *Advantages of the Color Octet Gluon Picture*, *Phys. Lett. B* **47**, 365 (1973).
- 8 E.D. Bloom, et al., *Phys. Rev. Lett.* **23**, 930 (20 October 1969).
- 9 G. ‘t Hooft, *When was Asymptotic Freedom discovered? or The Rehabilitation of Quantum Field Theory*. arXiv:hep-th/9808154v2.
- 10 Marco van Leeuwen et al. *Run-3 van de Large Hadron Collider*, NTvN **88-11** (2022).
- 11 Tristan du Pree, *De volgende versneller*, NTvN **88-11** (2022).