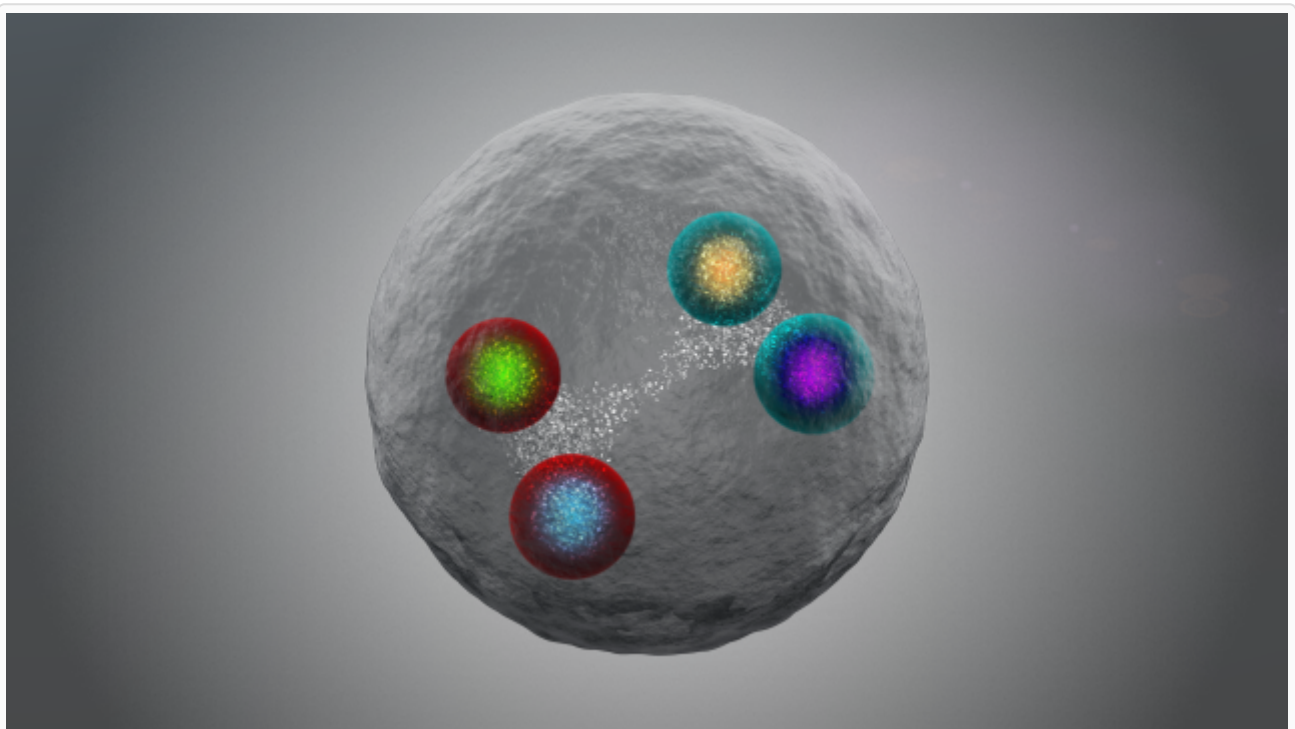


Een exotisch deeltje met vier quarks

Natuurkundigen hebben met van de deeltjesversneller op het CERN een nieuw deeltje ontdekt dat uit vier quarks bestaat. Hoe past dit zogeheten 'tetraquark' bij de deeltjes die we al kennen, en wat is er zo bijzonder aan?



Afbeelding 1. Het tetraquark. Artist's impression van het tetraquark – een deeltje dat bestaat uit maar liefst vier quarks. Afbeelding: CERN.

Quarks: de bouwstenen van de materie

De bouwstenen van het nieuw ontdekte deeltje, de quarks, kennen we al jaren. In de jaren 40, 50 en 60 werd er door natuurkundigen een enorme 'dierentuin' aan nieuwe materiedeeltjes ontdekt: deeltjes die net als bijvoorbeeld protonen en neutronen allemaal invloed op elkaar bleken te kunnen uitoefenen met behulp van de **sterke kernkracht**. Deeltjes met die eigenschap worden ook wel 'hadronen' genoemd. In 1964 bedachten Murray Gell-Mann en George Zweig, onafhankelijk van elkaar, dat het enorme aantal nieuwe hadronen verklaard

zou kunnen worden door aan te nemen dat die deeltjes uit nog kleinere bouwstenen bestonden; een kleine verzameling van basisdeeltjes die zelf ook gevoelig waren voor de sterke kernkracht. Zweig noemde de nieuwe bouwsteentjes 'aces', maar het was de naam die Gell-Mann bedacht die zou blijven hangen: 'quarks'.

In de modellen van Gell-Mann en Zweig waren drie soorten quarks nodig om de bekende hadronen te kunnen verklaren. Tegenwoordig weten we dat er maar liefst zes soorten quarks bestaan: deeltjes die de mooie namen *up*, *down*, *charm*, *strange*, *top* en *bottom* hebben gekregen. De zes quarks vormen drie 'generaties' waarvan de twee leden steeds in allerlei eigenschappen sterk op die van de andere generaties lijken. Het belangrijkste verschil tussen de quarks uit verschillende generaties is hun massa: het up- en downquark zijn het lichtst, strangequark is al tientallen keren zwaarder, de charm- en bottomquarks zijn nog enkele honderden keren zwaarder dan dat, en het topquark steekt daar nog eens enkele tientallen keren bovenuit. Vanaf het charmquark zijn de deeltjes zó zwaar dat ze alleen in grote deeltjesversnellers met veel moeite geproduceerd kunnen worden.

De zware quarks zien we in de natuur dus maar heel weinig; de lichte quarks zijn daarentegen overal om ons heen. De protonen en neutronen waaruit alle atoomkernen zijn opgebouwd bestaan bijvoorbeeld elk uit drie up- en downquarks, en allerlei andere deeltjes die in de natuur en in versnellers veelvuldig worden geproduceerd (de zogeheten *mesonen*) bestaan elk uit twee quarks.

three generations of matter (fermions)			
	I	II	III
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u up	c charm	t top
QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

Afbeelding 2. De verschillende quarks. Een tabel van de zes soorten quarks met daarin hun massa, lading en spin aangegeven. Deel van een tabel van het standaardmodel van elementaire deeltjes; de hele tabel is op [Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Quark) te vinden.

Een quark komt nooit alleen

Het vreemde is: een énkél quark zul je nooit aantreffen. De hadronen die we in de natuur vinden bestaan vrijwel allemaal uit twee of drie quarks. Daar is een goede reden voor: de *lading* van de quarks staat dat niet toe.

Het idee van ‘lading’ kennen we uit het elektromagnetisme. Daar stoten deeltjes die allebei

een positieve of juist een negatieve lading hebben elkaar af – de reden dat je haren overeind gaan staan als je een elektrische schok krijgt – en trekken deeltjes met verschillende ladingen elkaar juist aan. Dat laatste zien we bijvoorbeeld in atomen, waar negatief geladen elektronen keurig in de buurt van de positief geladen en dus aantrekkende atoomkernen blijven.

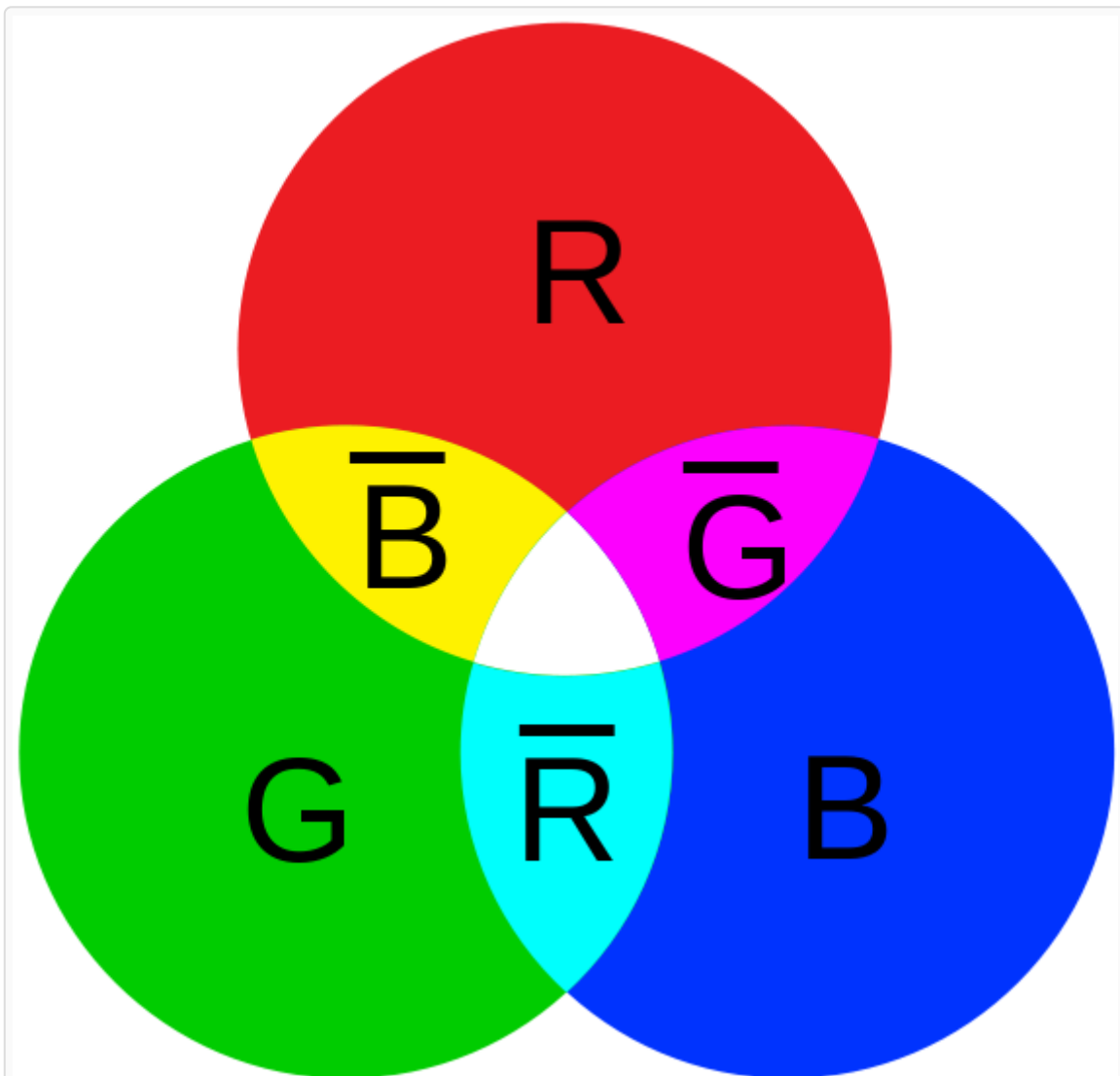
Hoe sterk de afstotende of aantrekkende kracht tussen elektrische ladingen is, hangt af van de afstand: hoe groter de afstand tussen twee elektrisch geladen deeltjes, hoe zwakker de kracht. Dat klinkt heel voor de hand liggend, maar gek genoeg blijkt de sterke kernkracht in dit opzicht heel anders te werken. Ook deeltjes die de sterke kernkracht op elkaar uitoefenen, zoals de quarks, zijn geladen, maar tussen quarks neemt de kracht juist *toe* als de afstand groter wordt. Het resultaat: je kunt geladen quarks met de beste wil van de wereld niet uit elkaar trekken. De deeltjes komen alleen in groepjes voor waarvan de netto lading nul is.

Een kleurrijk geheel

De lading van quarks heeft een tweede bijzondere eigenschap. Waar we van elektrische lading maar één soort kennen – een soort lading die in positieve en negatieve veelvouden kan voorkomen – hebben de quarks maar liefst *drie* soorten lading. Ook hier waren de natuurkundigen weer creatief in hun naamgeving. In plaats van ‘positief 1’, ‘positief 2’ en ‘positief 3’ werden de ladingen ‘rood’, ‘groen’ en ‘blauw’ genoemd.

Die naamgeving werd niet zomaar gekozen. Er blijken namelijk twee manieren te zijn om deeltjes te maken die geen netto ‘kleurlading’ hebben. De eerste manier is vrijwel gelijk aan wat er met de elektromagnetische kracht gebeurt in een atoom. Als je een ‘positief rood’ geladen quark samenbrengt met een ‘negatief rood’ geladen quark krijg je een ongeladen geheel. Negatief geladen deeltjes bestaan ook voor de quarkladingen: elk soort quark kent een ‘antiquark’ met precies de tegengestelde lading. In plaats van ‘negatief rood’, ‘negatief groen’ en ‘negatief blauw’ werd ook hier natuurlijk een kleurrijkere naam bedacht. De omgekeerde ladingen gingen heten naar de tegengestelde kleuren: cyaan, magenta en geel.

De tweede manier om ongeladen deeltjes te maken, vormde de reden dat de kleurbenaming zo toepasselijk was. Het blijkt namelijk ook mogelijk om een rood, groen en blauw geladen quark samen te brengen, en ook dan is het resultaat ongeladen. Een rood en een groen quark samen hebben dus precies dezelfde lading als een geel ('negatief blauw') anti-quark. Net zoals rood en groen licht er samen geel uitzien, zo zien rode en groene quarks er samen ook geel uit. De kleur-analogie laat je precies zien welke combinaties van quarks er vrij in de natuur kunnen voorkomen: de combinaties die samen 'wit' zijn.



Afbeelding 3. Kleurlading. De drie kleurladingen (R, G en B) en hun negatieve varianten, aangegeven met een streep boven de letter. Waar

kleuren overlappen is te zien tot welke kleurlading de ladingen combineren. Alleen 'witte' combinaties kunnen vrij in de natuur voorkomen. Afbeelding: [Maschen](#).

Vier, vijf, zes, ...

Een enkel quark is nooit 'kleurloos', en zal dus niet zelfstandig voorkomen. Van twee quarks met precies tegengestelde kleuren –rood en cyaan, groen en magenta, blauw en geel – kun je een zogeheten 'meson' bouwen. Van drie quarks – rood, groen en blauw of juist geel, cyaan en magenta – kun je deeltjes bouwen die 'hadronen' heten – de al genoemde protonen en neutronen zijn de bekendste voorbeelden.

Het aantal mogelijkheden is gigantisch. Voor elk quark kun je natuurlijk nog kiezen of je een up-, down-, strange-, charm-, bottom- of topquark kiest. Niet alle combinaties die je zo kunt maken zijn even stabiel, maar heel veel kunnen er toch in deeltjesversnellers geproduceerd worden, en dat is dan ook precies de reden dat er in de jaren 40 tot 60 zo ontzettend veel nieuwe deeltjes ontdekt werden.

En waarom zou het bij drie ophouden? Je kunt ook combinaties van vier of meer kleuren kiezen die samen 'wit' opleveren: rood, groen, cyaan en magenta, bijvoorbeeld. Kunnen er ook deeltjes bestaan die uit vier of nog meer quarks bestaan?

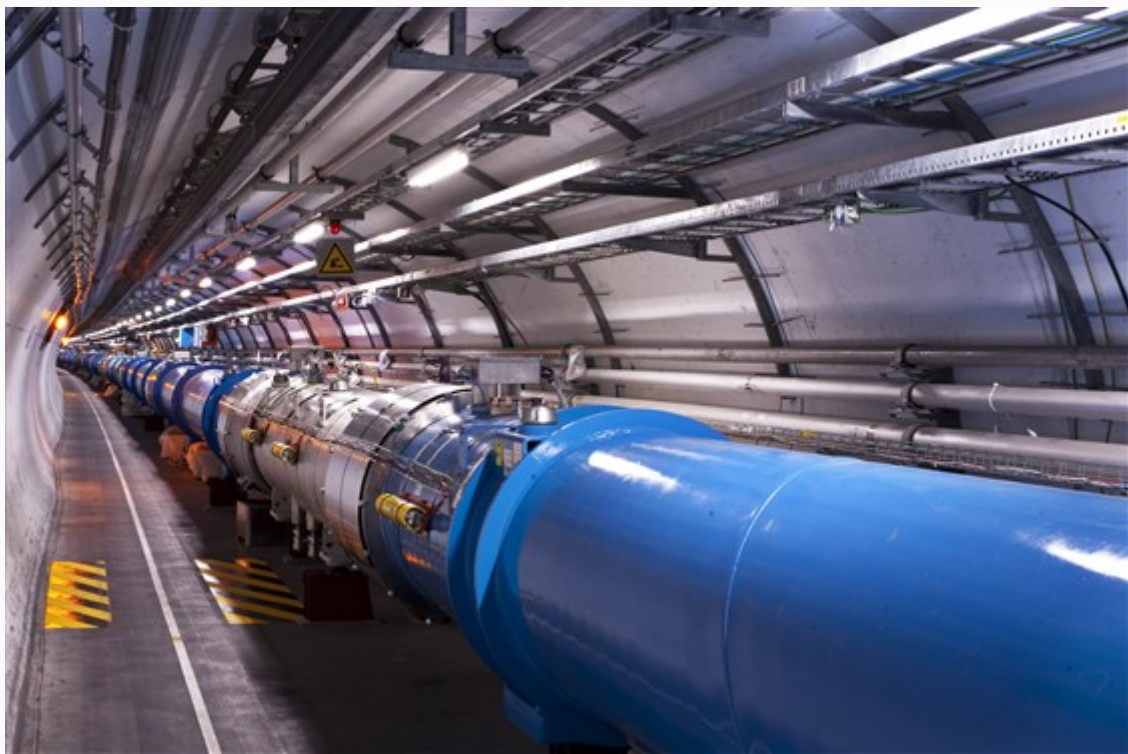
Er is geen enkele reden om aan te nemen dat dat *niet* kan. De theorie die Gell-Mann en Zweig bedachten staat zulke combinaties gewoon toe. De kans dat zulke deeltjes enigszins stabiel zijn wordt wel kleiner naarmate het aantal bouwstenen groeit: combinaties van vier, vijf of zelfs zes quarks lijken met de nodige moeite nog wel waarneembaar, maar het maken van deeltjes met nóg grotere aantallen bouwstenen lijkt voorlopig uitgesloten.

Een nieuw tetraquark

Overigens is het met vier of meer 'kleuren' wel altijd zo dat je met een deel van de quarks

óók een kleurloze combinatie kunt maken. Denk aan ons voorbeeld 'rood, groen, cyaan en magenta': daar zijn 'rood en cyaan' samen al kleurloos, en 'groen en magenta' ook. Een interessante vraag is nu: moeten we een combinatie van vier of meer quarks dan vergelijken met een atoom, waar alle deeltjes samengeklonterd zijn en één gebonden geheel vormen, of gaat het eerder om een soort molecuul, waarin de deeltjes groepsgewijs neutrale delen vormen die vervolgens losjes aan elkaar gebonden zijn? Hier geeft de theorie geen uitsluitel: beide soorten verbindingen tussen quarks lijken in principe mogelijk.

De nieuw gevonden combinatie van vier quarks is in twee opzichten bijzonder. Ten eerste lijkt het hier daadwerkelijk te gaan om een 'atoom' van vier quarks die samen één geheel vormen. Er waren wel eerder tetraquarks waargenomen - de eerste al in 2003 - maar die leken allemaal een 'molecuulstructuur' te hebben: ze leken te bestaan uit twee paren van elk twee tegengesteld geladen deeltjes. Wat het nieuwe tetraquark verder bijzonder maakt is dat het voor het eerst is dat een tetraquark uit vier *dezelfde* quarks bestaat: in dit geval is het deeltje opgebouwd uit vier charm-quarks. Beide nieuwe eigenschappen maken het enorm interessant om dit nieuwe deeltje verder te bestuderen en zo preciezer te ontdekken op welke manieren quarks grotere deeltjes kunnen vormen.



Afbeelding 4. De Large Hadron Collider. Een stukje van de 27 kilometer lange buis in Genève waarin deeltjes tot bijna de lichtsnelheid versneld worden. Bij de botsingen tussen die deeltjes ontstaan onder meer tetraquarks. Afbeelding: CERN.

Statistiek voor gevorderden

Het bestuderen van tetraquarks (en eventuele nog grotere deeltjes) valt overigens niet mee. De tetraquarks zelf bestaan maar heel kort, en vallen dan uit elkaar in kleinere bestanddelen – in het geval van het tetraquark bijvoorbeeld in twee mesonen. Die mesonen worden waargenomen in de experimenten van het CERN, en vervolgens moet er dus teruggedeneerd worden aan de hand van de soorten waargenomen deeltjes en hun eigenschappen, om zo te kunnen concluderen of de bron van de mesonen inderdaad een tetraquark was.

Het probleem daarbij is dat er ook allerlei ándere manieren zijn waarop bij de botsingen in de

deeltjesversneller mesonen kunnen ontstaan. Mesonen kunnen direct gevormd worden, of ontstaan als vervalproducten uit heel andere, zwaardere deeltjes. De vraag of er tetraquarks gevormd zijn is er daarmee een van gevorderde statistiek. We kunnen berekenen hoe vaak we uit welke processen mesonen verwachten, en als we nu in de praktijk bovenop die kansverdeling nóg een piekje van extra mesonen zien, weten we dat er sprake is van tetraquarks.

Een dergelijk piekje is nu dus waargenomen. 'Nu' betekent overigens: na het bestuderen van data die al was verzameld tijdens de runs van de deeltjesversneller van 2009 tot 2013 en van 2015 tot 2018 – op dit moment is de Large Hadron Collider namelijk gesloten voor onderhoud. De afwijking van de verwachting die men in de oude data vond, was groot genoeg om van een 'ontdekking' te spreken. Daarvoor is in de deeltjesfysica een heel precieze definitie: het piekje moet dan een kans van minder dan 1 op de 3,5 miljoen hebben om door toeval ontstaan te zijn.

Ondanks het statistische karakter is de meting van het tetraquark dus behoorlijk precies, maar als we vervolgens niet alleen willen weten dat het deeltje bestaat, maar ook zijn eigenschappen willen begrijpen, zullen we nog veel verder moeten gaan en nog veel meer data moeten bestuderen. Zodra de Large Hadron Collider weer wordt aangezet, volgens planning in mei 2021, zal er ook juist naar tetraquarks gezocht worden. Hopelijk leren we daarmee nog veel meer over deze interessante nieuwe deeltjes – en daarmee over de quarks waaruit alles om ons heen is opgebouwd.