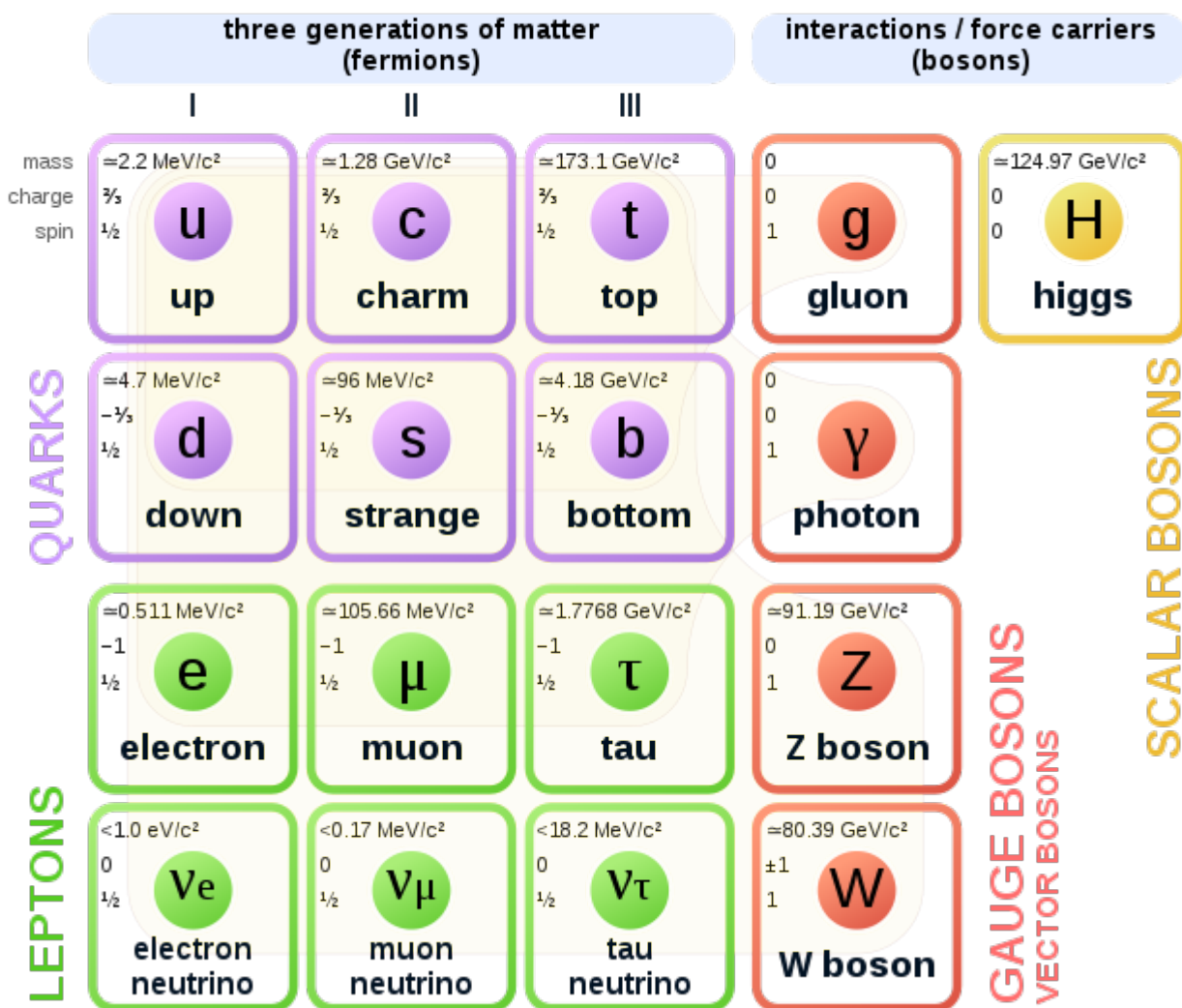


Deeltjes en niet-deeltjes

Volgens het standaardmodel is alle materie in het universum opgebouwd uit 17 soorten elementaire deeltjes. Deeltjesfysicus Howard Georgi bedacht echter dat ons universum mogelijk ook een ander soort bouwstenen bevat: ‘unparticles’, oftewel ‘ondeeltjes’. Deze niet-deeltjes zijn anders dan de deeltjes die we kennen; ze hebben bijvoorbeeld geen vaste massa. Ehh, wat?!

Standard Model of Elementary Particles



Afbeelding 1. Het standaardmodel van de deeltjesfysicaIn deze tabel staan alle soorten elementaire deeltjes van het standaardmodel beschreven. De waarden van hun massa's staan linksboven in ieder hokje. Deze waarden worden steeds nauwkeuriger bepaald, dus de grenswaarden die hier (in 2019) genoemd worden zijn aan verandering onderhevig. Bron: [Wikipedia](#)

Een wereld van deeltjes

Om te begrijpen wat ondeeltjes zijn, moeten we eerst even terug naar de vraag “Wat is een deeltje?” Hierbij hebben we al wel enige intuïtie, want de wereld die we kennen is er een die bestaat uit deeltjes. Zo bestaat water uit watermoleculen, die weer opgebouwd zijn uit één zuurstofatoom en twee waterstofatomen, die zelf weer zijn opgebouwd uit elektronen, protonen en neutronen. Protonen en neutronen bestaan weer uit drie quarks, en dan ben je bij de grens van de meest fundamentele soort bouwstenen van materie, aldus het [standaardmodel van de deeltjesfysica](#).

Afbeelding 1 laat de bekende tabel zien van de 17 soorten fundamentele deeltjes die in het standaardmodel beschreven worden. Klein detail: deze deeltjes zijn geen minuscule harde balletjes, maar gelocaliseerde trillingen van diverse ‘quantumvelden’. Het standaardmodel is namelijk gebaseerd op [quantumveldentheorie](#), wat postuleert dat het universum is gevuld met verschillende soorten velden – één voor ieder soort deeltje. Hoe je zo’n lokale trilling van een veld kunt herkennen als een deeltje wordt gevisualiseerd in de video hieronder. (Een uitgebreidere uitleg hiervan vind je ook in de latere delen van onze [serie](#) over quantumfysica.)

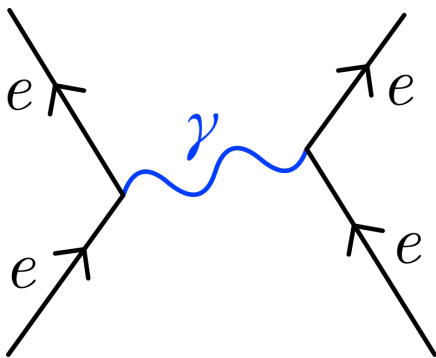
Video 1. Deeltjes als trillingen in een quantumveldEen kort stukje uit een [video van Fermilab](#) over quantumveldentheorie.

De meerderheid van de deeltjes in het standaardmodel, die aan de linkerkant van afbeelding 1, zijn zogeheten [fermionen](#). Dit zijn de ‘materiedeeltjes’ die de bouwstenen vormen van alle materie in het universum. Hieronder vallen het hierboven genoemde elektron en verschillende soorten quarks.

Naast fermionen bevat het tabel ook vijf door deeltjesversnellers bevestigde soorten krachtvoerende deeltjes, oftewel *bosonen*. Deze deeltjes zorgen onder meer voor de

wisselwerkingen tussen de verschillende fermionen. Ze zorgen ervoor dat fermionen elkaar aantrekken of afstoten, en spelen een rol in het vervallen van zwaardere deeltjes in lichtere.

Een voorbeeld van een boson is het foton, het deeltje dat de elektromagnetische kracht overbrengt. Een foton is een enkele golf in het elektromagnetische veld, oftewel: een quantumdeeltje van licht. Elektrisch geladen deeltjes zoals elektronen kunnen fotonen uitzenden of absorberen. Dit verklaart bijvoorbeeld waarom de baan van een elektron wordt omgebogen in een elektromagnetisch veld, en waarom elektronen elkaar onderling afstoten.



Afbeelding 2. Een Feynmandiagram van een interactie tussen twee elektronen Door te koppelen aan fotonen (blauw) worden elektronen (zwarte lijnen) van elkaar afgestoten door de elektromagnetische kracht.

Disclaimer: diagrammen zoals deze moet je niet letterlijk interpreteren als de weergave van een fysisch proces; dit soort *Feynmandiagrammen* zijn een abstracte visuele weergave van wiskundige termen die interacties tussen deeltjes in een quantumveldentheorie beschrijven. Afbeelding: Jans Henke

De relevantie van massa

Alle deeltjes in het standaardmodel hebben als basiseigenschap een bepaalde massa. In afbeelding 1 kun je de massa's van alle deeltjes linksboven in ieder hokje aflezen. Deze worden gegeven in eenheden van energie (elektronvolt, eV), gedeeld door het kwadraat van de lichtsnelheid (c^2). Zo is de massa van een elektron $0,511 \text{ MeV}/c^2 = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

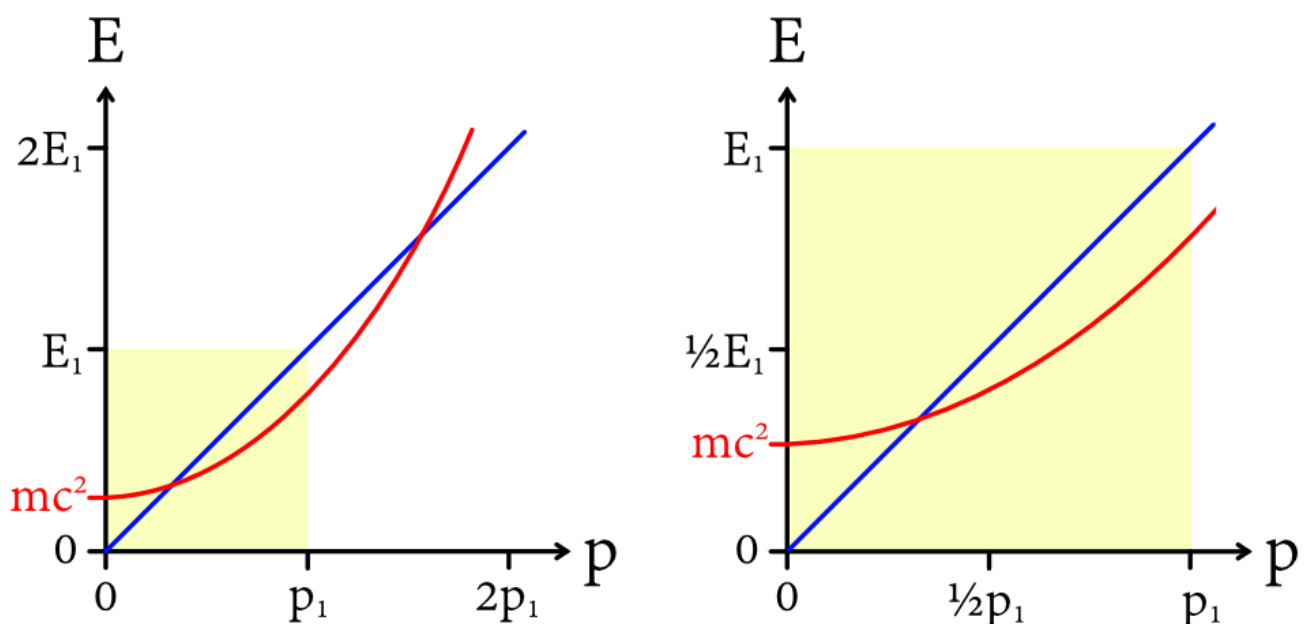
Dat je massa in termen van energie kunt uitdrukken kun je zien in de beroemde vergelijking van Einstein, die vertelt dat energie evenredig is met de massa van een object in rust: $E = mc^2$. De volledige uitdrukking, die ook geldt als het object niet in rust is, is $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$. De p die hierin staat geeft de hoeveelheid van beweging (*impuls*) van het deeltje weer, c de snelheid van licht, en m de rustmassa, oftewel de massa van het deeltje wanneer het

absoluut stil zou staan. Hoewel de energie van een deeltje dus kan variëren aan de hand van hoeveel het beweegt, staat zijn rustmassa altijd vast. $E = mc^2$ beschrijft dus de minimale, intrinsieke energie van een deeltje met een bepaalde rustmassa.

Een kleine voetnoot hierbij: wanneer bijvoorbeeld elektronen door een materiaal voortbewegen, in plaats van lege ruimte, krijgen ze door de interactie met hun omgeving een andere, effectieve massa. Elektronen in materialen zijn daardoor technisch gesproken geen zuivere elektronen meer, maar *quasideeltjes*. Hetzelfde kan ook andere deeltjes overkomen.

Een schaalloos bestaan

De massa van een elektron is dan wel klein, maar sommige deeltjes hebben precies massa nul. Het foton is hier een voorbeeld van. Zonder rustmassa hebben fotonen geen intrinsieke energie, en schaalt hun totale energie dus evenredig met hun impuls, $E = pc$. Een gevolg hiervan blijkt te zijn dat de snelheid van licht (c) altijd hetzelfde is, onafhankelijk van de energie van het foton waarvan je de snelheid meet.



Afbeelding 3. Massaloze deeltjes zijn schaalinvariant, massieve deeltjes niet. Deze twee grafieken laten schematisch de relatie zien tussen de energie (E) en impuls (p) van een deeltje mét (rood) of zónder (blauw) rustmassa. Deze relaties worden beide beschreven door de relatie $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$, wat voor een massaloos

deeltje vereenvoudigt tot $E = pc$. Door de grafieken te vergelijken op twee verschillende schalen, oftewel door rechts in te zoomen op het gele vlak in de linkergrafiek, is duidelijk dat massaloze deeltjes zich op iedere schaal hetzelfde gedragen, want de blauwe lijn ziet er op iedere schaal hetzelfde uit. Deeltjes met massa hebben deze eigenschap niet. Afbeelding: Jans Henke.

Deeltjes zonder massa zijn *schaalinvariant*, wat inhoudt dat de sterkte van interacties tussen deeltjes niet afhangt van hun energie – zie afbeelding 3. Anders gezegd is een schaalinvariante theorie een waarin alle begrippen die eenheden hebben – energie, impuls, positie, tijd, bijna alles – kunnen worden vermenigvuldigd met willekeurige factoren zonder de fysica te veranderen. Een deeltje met massa kan echter nooit schaal invariant zijn, omdat die massa vaststaat en niet met een schaalverandering mee zou kunnen veranderen.

Schaalloos met massa

Hiermee komen we terug op [het idee van Howard Georgi](#): wat als er in ons universum quantumvelden zouden bestaan die wel een geassocieerde massa hebben, maar toch schaal invariant zouden zijn? Die velden kunnen dan geen gewone deeltjes beschrijven, omdat die zoals we gezien hebben per definitie een vaste massa hebben en dus níet schaal invariant zijn. Vandaar de naam ‘ondeeltjes’: de theorie beschrijft dan objecten met een massa die niet vastligt maar die evenredig schaalt met de energie. Bij zulk ‘spul’ kunnen we vrijwel al onze normale natuurkundige intuïtie in de prullenbak gooien.

Toch liet Georgi zien dat ondeeltjes prima binnen de wiskundige constructie van quantumveldentheorie kunnen bestaan. Je kunt ze wiskundig namelijk beschrijven als een optelsom van quantumvelden met alle mogelijke massa’s, van nul tot oneindig. Een verandering van schaal, waarin je bijvoorbeeld alle lengte- en tijdsdimensies vergroot met een factor vijf ($x \rightarrow 5x$, $t \rightarrow 5t$), geeft met de juiste verdeling van massa’s binnen de som precies dezelfde wiskundige uitdrukking terug als vóór de schaalverandering. Hiermee zijn ondeeltjes schaal invariant.

Zoeken naar iets wat je niet kunt zien

Dat iets wiskundig gezien kán bestaan, wil natuurlijk nog niet zeggen dat het ook in de natuur voorkomt. De vraag is dus: hoe zou je kunnen meten of er ook ondeeltjes in de natuur zijn? Als we ervan uitgaan dat ondeeltjes en deeltjes met elkaar zouden kunnen

wisselwerken, zouden deeltjesversnellers zoals de [Large Hadron Collider \(LHC\)](#) van CERN ze kunnen herkennen aan de hand van ontbrekende energie en ontbrekende impuls in de waargenomen deeltjes-eindproducten in botsingsprocessen.

Om dit te kunnen vaststellen heb je niet één meting nodig, maar heel veel. Door te kijken naar hoeveel energie er mist per deeltjesbotsing, en dat te vergelijken met de hoeveelheid ontbrekende impuls, zou je kunnen kwantificeren hoeveel 'deeltjes' je niet ziet. Omdat massa en impuls van een ondeeltje kunnen variëren, zouden ondeeltjes daarbij lijken op een *niet geheel* aantal onzichtbare, massaloze deeltjes. Het zou zijn alsof de geavanceerde detectoren van de LHC niet één, twee of drie deeltjes zouden missen, maar een raar aantal als 2,73. Een dergelijke meting zou een sterke aanwijzing voor het bestaan van ondeeltjes kunnen zijn.

Tot op de dag van vandaag, dertien jaar na Georgi's voorstel, heeft de LHC nog geen ondeeltjes kunnen vinden. Daar maakt [Georgi](#) zich zelf overigens geen zorgen om:

In zekere zin is niet-deeltjesmateriaal een nieuwe metafoor voor wiskundige structuren die we op andere manieren begrijpen. Nieuwe metaforen kunnen krachtig zijn en dingen op nieuwe manieren met elkaar verbinden, wat leidt tot theoretische vooruitgang.

Of er ondeeltjes in ons universum rondzweven weten we dus (nog) niet, maar als inspiratiebron doet het idee wel zijn werk. Zo zijn er al voorstellen dat ondeeltjes verantwoordelijk zouden kunnen zijn voor [een vijfde fundamentele natuurkracht](#), of voor [hoge-temperatuur supergeleiding](#). Maar daar hebben we het een andere keer wel over!

Georgi's oorspronkelijke artikel: Howard Georgi, "[Unparticle Physics](#)". *Physical Review Letters* **98**, 221601 (2007).

Artikel-afbeelding: ["Quantum Surge" door Drake1132](#).