

Het standaardmodel: nu en in de toekomst

In de deeltjesfysica zijn we op zoek naar de wetten van de natuurkunde op de kleinste afstanden. Ons huidige begrip kan worden samengevat in het 'standaardmodel', dat de fundamentele deeltjes en hun interacties beschrijft. De term fundamenteel betekent dat, voor zover we nu weten, die deeltjes niet in kleinere deeltjes opgesplitst kunnen worden. Hoewel het een succesvol model is laat het standaardmodel een aantal grote vragen onbeantwoord. Bijvoorbeeld: Wat is [donkere materie](#)? Waarom zien we alleen materie en geen [antimaterie](#) om ons heen? Wat is de theorie van [quantumzwaartekracht](#)? In dit artikel wil ik vertellen over het standaardmodel, wat we weten, wat we nog onderzoeken, en de actuele discussie over toekomstige deeltjesversnellers.



Afbeelding 1. De Large Hadron Collider. Met deze deeltjesversneller - in totaal 27 kilometer lang - en toekomstige nóg grotere versnellers onderzoeken natuurkundigen de eigenschappen van het standaardmodel. Foto: CERN.

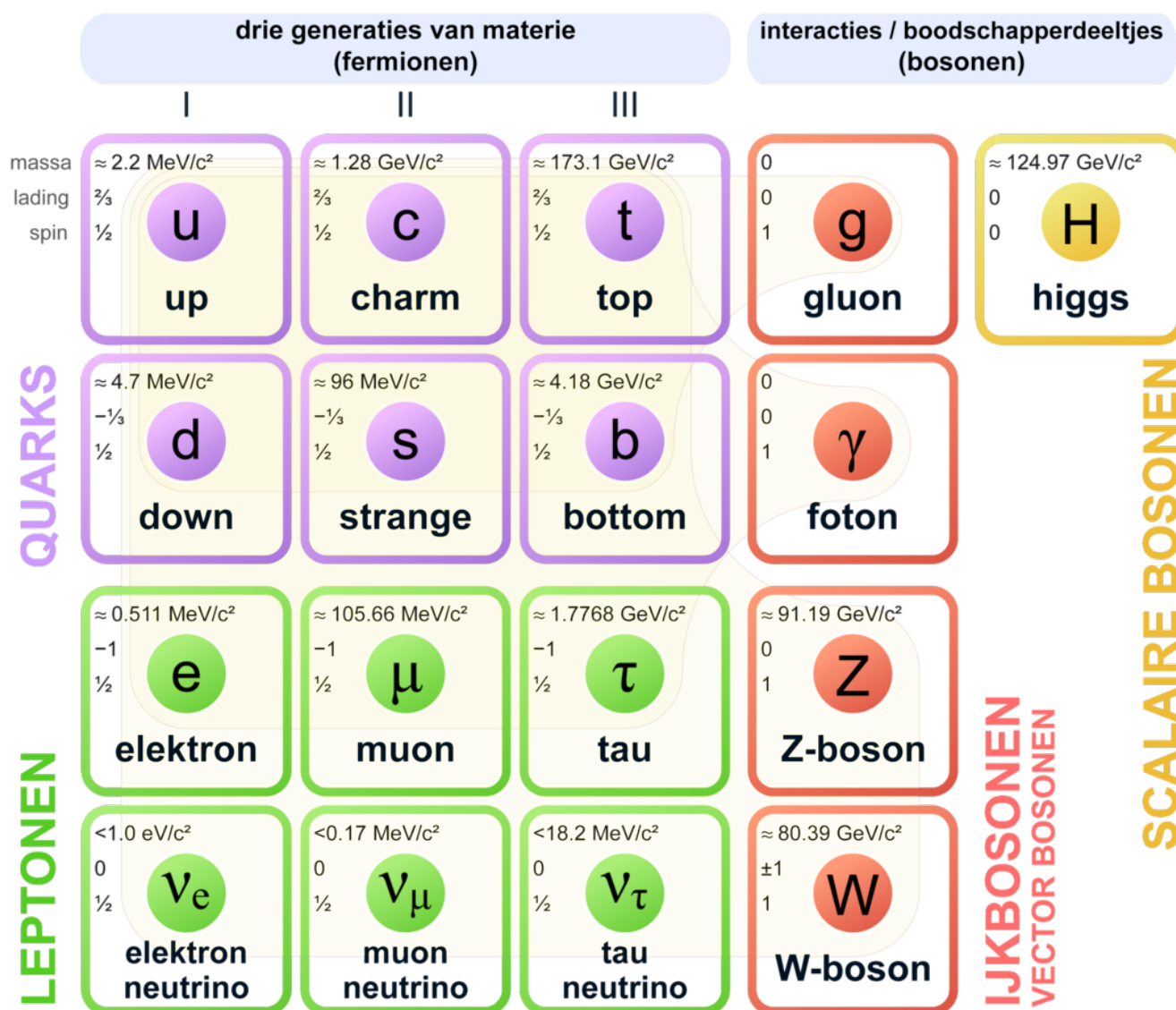
Het standaardmodel

De deeltjes in het standaardmodel kunnen opgesplitst worden in deeltjes waaruit materie is opgebouwd, deeltjes die krachten overbrengen, en het higgsdeeltje. De wereld om ons heen bestaat uit de protonen en neutronen in atoomkernen en de elektronen die daar omheen zoeven. De elektronen zijn fundamentele deeltjes, maar de protonen en neutronen zijn dat niet. Ze bestaan uit up- en downquarks. Er zijn echter nog veel meer deeltjes, zoals zwaardere versies van het elektron (bijvoorbeeld het muon) of quarks. De topquark is een echt zwaargewicht en weegt net zoveel als 172 protonen. Daarnaast zijn er ook de zeer lichte neutrino's die bijna geen interacties hebben, wat ze interessant maakt voor het bestuderen van het heelal door middel van [neutrino telescopen](#).

Van de deeltjes die krachten overbrengen, is het foton het bekendst - het is verantwoordelijk voor elektromagnetisme, en daarmee ook het licht waarmee je dit leest. Het gluon is verantwoordelijk voor de sterke kernkracht. Deze kracht is heel anders dan elektromagnetisme omdat hij niet zwakker maar juist sterker wordt op grote afstanden, een

beetje zoals wat je ervaart bij het uitrekken van een veer. Dit is de reden dat we geen 'vrije' quarks zien, maar altijd gebonden toestanden zoals protonen en neutronen. De sterke kernkracht is ook verantwoordelijk voor de stabiliteit van atoomkernen - zonder die aantrekkende kracht zouden de positief geladen protonen elkaar afstoten. Ten slotte is er de zwakke kernkracht, die overgebracht wordt door het W- en Z-deeltje en die bijvoorbeeld verantwoordelijk is voor het radioactieve verval van bepaalde deeltjes. De kracht is zwak in experimenten met lage energieën, omdat het W-en Z-deeltje behoorlijk zwaar zijn en dus niet zo gemakkelijk gemaakt worden.

Standaardmodel van de Elementaire Deeltjes



Afbeelding 2. Het standaardmodel. Een overzicht van alle deeltjes in het

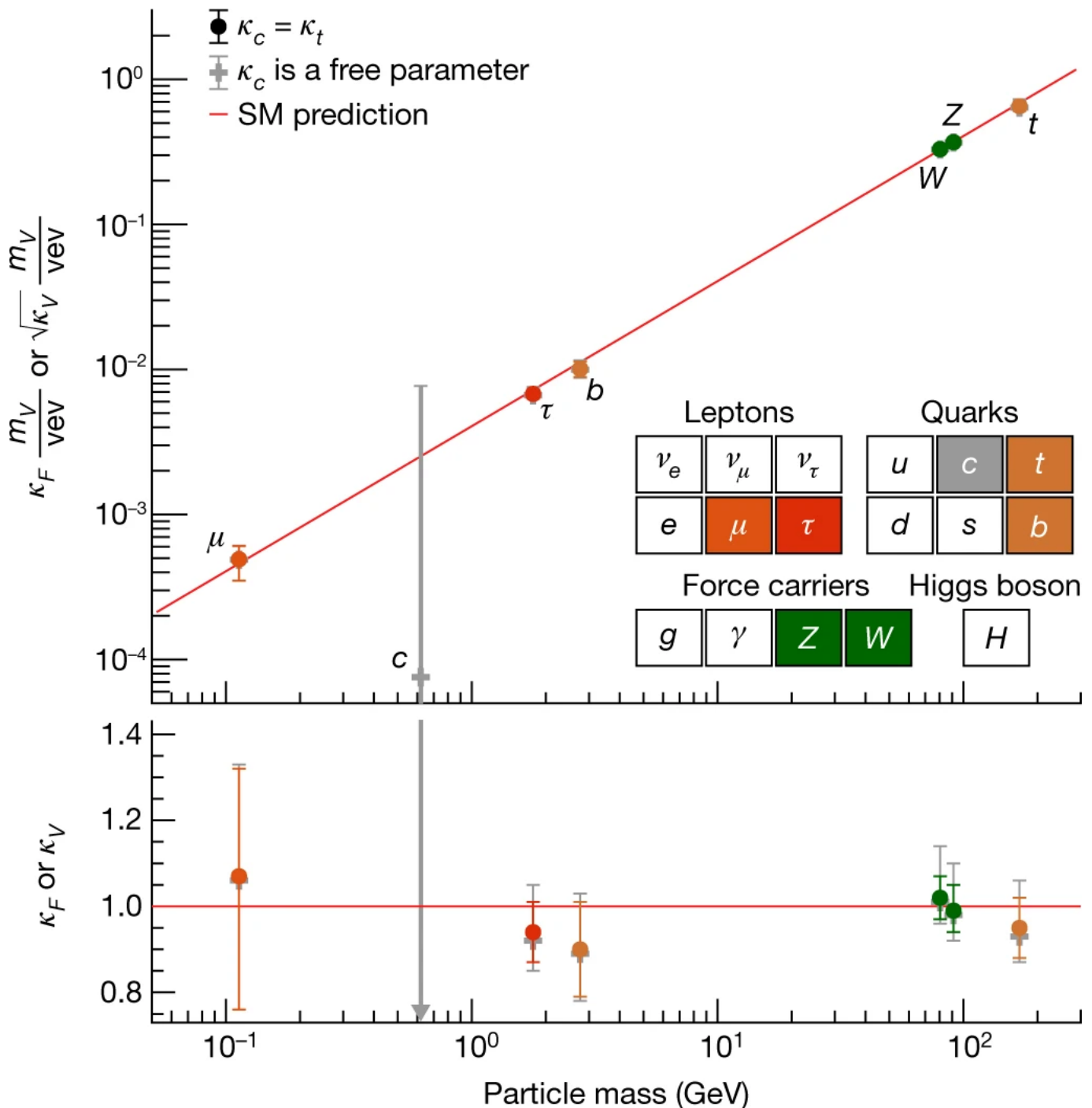
standaardmodel, en hun belangrijkste eigenschappen. Afbeelding via [Wikimedia Commons](#).

De Large Hadron Collider

Veel van de exotische deeltjes uit het standaardmodel kunnen we alleen met deeltjesversnellers produceren, door kinetische energie van de deeltjes die daarin rondsnelen om te zetten in massa van nieuwe deeltjes – iets wat mogelijk is dankzij Einsteins beroemde formule $E=mc^2$. Dit wordt nu onder meer gedaan door de Large Hadron Collider (LHC) in Genève, waar in een ondergrondse tunnel, met een omtrek van 27 kilometer, protonen worden versneld tot ze een energie hebben van 6800 keer hun massa! Aangezien deze botsingen door [quantummechanica](#) beschreven worden, hebben we geen controle over wat er geproduceerd wordt. We kunnen enkel observeren wat er gebeurt en hopen interessante processen waar te nemen, waardoor we de eigenschappen van deeltjes beter zullen begrijpen en hopelijk nieuwe ontdekkingen doen.

Het higgsdeeltje: een verwachte ontdekking

Toen de LHC gebouwd werd, bevonden we ons in een interessant tijdperk in de deeltjesfysica. We wisten namelijk dat het standaardmodel niet compleet kon zijn, omdat volgens die theorie de kansen op bepaalde processen samen boven de 100% uit zouden komen bij de energieën die de LHC kon bereiken. Dit is in de natuurkunde een ongebruikelijke situatie: meestal ga je iets onderzoeken dat je nog niet kent, terwijl hier een ontdekking gegarandeerd was. Toen in 2012 het higgsdeeltje werd ontdekt, was dat dan ook geen verrassing, hoewel er ook concurrerende theorieën waren. Sinds een paar jaar zijn we de eigenschappen van het higgsdeeltje grondig aan het onderzoeken. Volgens het standaardmodel is de massa van veel deeltjes evenredig met de sterkte waarmee ze interacties aangaan met het higgsdeeltje. Het testen van deze voorspelling was relatief makkelijk voor de zwaardere deeltjes, zoals de topquark en het W- en Z-deeltje. Voor de lichte deeltjes, waaruit de wereld om ons heen bestaat, zullen deze tests echter nog een tijd duren, en zijn nieuwe creatieve ideeën vereist om ze uit te kunnen voeren. Voorlopig weten we dus niet (zeker) hoe die deeltjes aan hun massa komen. Ook de interacties van een higgsdeeltje met andere higgsdeeltjes hebben we nog niet in onze experimenten gezien.



Afbeelding 3. Van higgs naar andere deeltjes. Een grafiek die weergeeft hoe gemakkelijk of moeilijk bepaalde deeltjes uit het higgsboson gemaakt kunnen worden. De zwaardere deeltjes (meer naar rechts) komen meer voor (hoger in de grafiek) dan de lichtere deeltjes. Voor die deeltjes zijn de voorspelde interacties (weergegeven met de rode lijn) dus makkelijker te testen. De verticale strepen geven aan wat de onzekerheid is in de gemeten interacties; in de onderste grafiek zijn die ten opzichte van de lijn uitvergroet. Uit: [A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery.](#)

De toekomst: veel meer data, nieuwe deeltjesversnellers, nieuwe fysica?

Op dit moment heeft nog maar tussen de 5% en 10% van het totaal aantal botsingen plaatsgevonden dat de LHC zal produceren, dus in de komende jaren zullen we nog veel meer leren. Tegelijkertijd vindt er nu ook een discussie plaats over toekomstige deeltjesversnellers. Hier ligt de focus op een zogenaamde 'Higgs factory', waar de eigenschappen van het higgsdeeltje met extreme precisie bepaald kunnen worden. De hoop is dat een kleine afwijking ten opzichte van het standaardmodel ons nieuwe inzichten zal geven, net als een kleine afwijking in de baan van Mercurius een hint was over algemene relativiteitstheorie. Eén voorstel voor zo'n Higgs factory is de Future Circular Collider (FCC), waarvan het tussentijdse verslag van de haalbaarheidsstudie op CERN besproken wordt. Saillant detail is dat er in China een soortgelijk voorstel (CEPC) op tafel ligt, met een vrij agressieve tijdsplanning. Misschien leidt dit tot een nieuwe 'space race'? In tegenstelling tot de LHC, waar de ontdekking van het higgsdeeltje niet echt als verassing kwam, weten we dit keer niet wat we zullen ontdekken. Ik ben benieuwd!