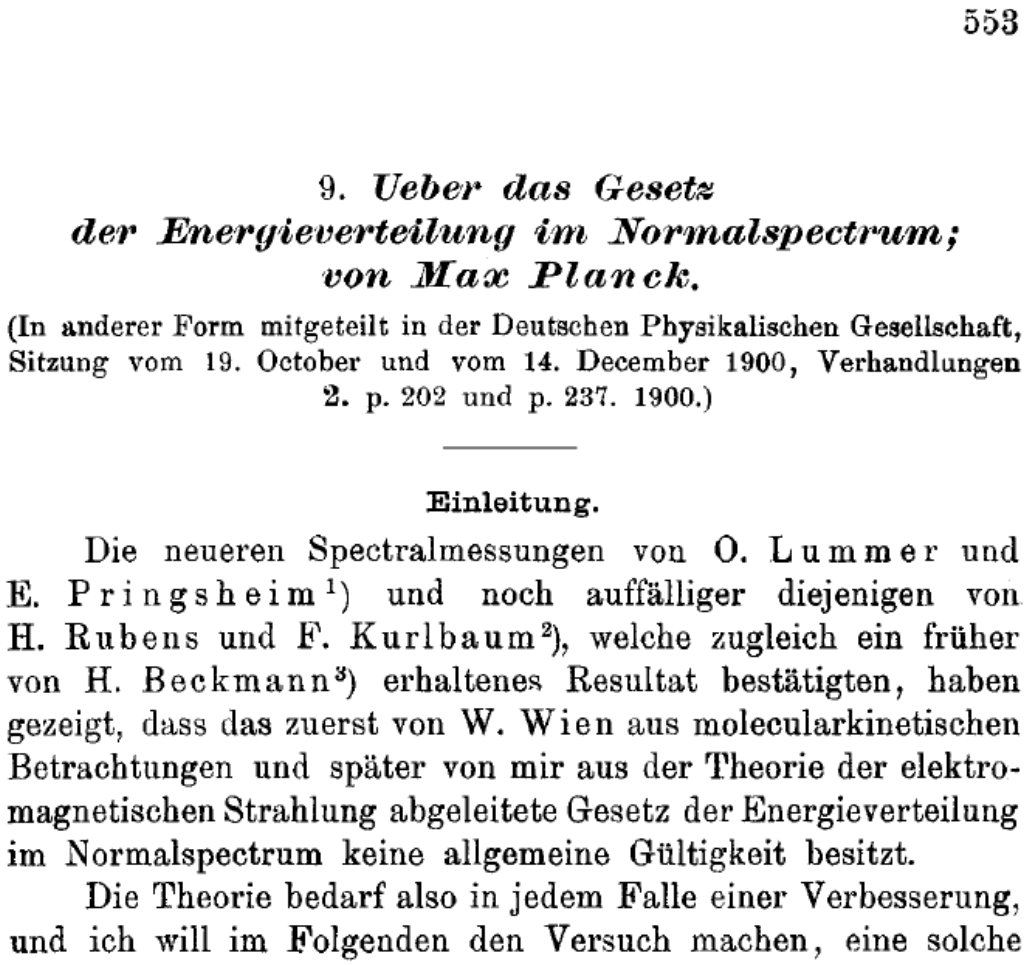
Quantumfysica (14): Het standaardmodel

Dit is het veertiende artikel uit het dossier Quantumfysica. In het dertiende artikel zagen we dat er in de natuur twee heel verschillende soorten quantumdeeltjes bestaan: bosonen en fermionen.

De quantumfysica is inmiddels ruim een eeuw oud. Het beroemde werk van Max Planck aan de straling van zwarte lichamen, dat meestal beschouwd wordt als de geboorte van de quantummechanica, stamt uit 1900. Het is echter niet zo dat de quantumtheorie aan het begin van de 20e eeuw al direct een volledige, afgeronde theorie was. In de vorige drie artikelen, over quantumveldentheorie, hebben we gezien dat het nog tientallen jaren duurde voordat het volledige raamwerk, dat we tegenwoordig gebruiken om de quantumfysica te beschrijven, voltooid was.



553

9. *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum;* *von Max Planck.*

(In anderer Form mitgeteilt in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sitzung vom 19. October und vom 14. December 1900, Verhandlungen 2. p. 202 und p. 237. 1900.)

Einleitung.

Die neueren Spectralmessungen von O. Lummer und E. Pringsheim[1]) und noch auffälliger diejenigen von H. Rubens und F. Kurlbaum[2]), welche zugleich ein früher von H. Beckmann[3]) erhaltenes Resultat bestätigten, haben gezeigt, dass das zuerst von W. Wien aus molecularkinetischen Betrachtungen und später von mir aus der Theorie der elektromagnetischen Strahlung abgeleitete Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum keine allgemeine Gültigkeit besitzt.

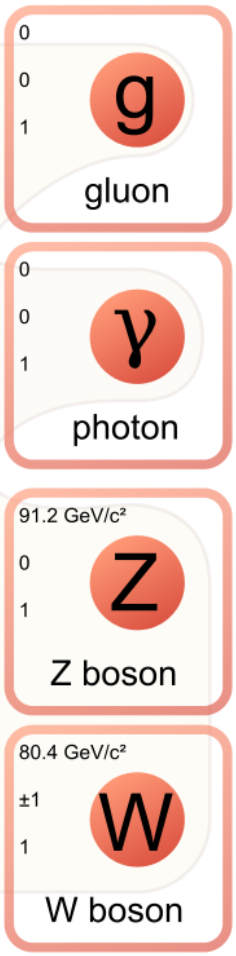
Die Theorie bedarf also in jedem Falle einer Verbesserung, und ich will im Folgenden den Versuch machen, eine solche

Afbeelding 1. Het artikel van Max Planck.Het artikel van Max Planck uit 1900 wordt in het algemeen gezien als de geboorte van de quantumtheorie.

Tot nu toe hebben we het in dit dossier vooral gehad over dat raamwerk: we hebben gezien dat alle grootheden op microscopische schaal – zowel “krachten” als “deeltjes” – beschreven kunnen worden door middel van velden. Bosonische velden beschrijven wat we meestal “krachten” noemen – bijvoorbeeld het elektromagnetisme – terwijl fermionische velden de klassieke deeltjes zoals elektronen beschrijven.

Halverwege de vorige eeuw was grotendeels duidelijk dat de natuur op de allerkleinste schaal op deze manier in elkaar zat. In zekere zin kende men daarmee echter alleen nog maar het decor van het toneelstuk. Er bleef nog een heel belangrijke vraag open: welke acteurs waren er, en welke rollen speelden die? Met andere woorden: welke quantumvelden zijn er in de natuur, en welke wisselwerkingen zijn er tussen die verschillende velden?

De bosonen



Afbeelding 2.

De bosonen (behalve het Higgsboson) uit het standaard-model.

Wat de “krachten” betreft, bleek het antwoord betrekkelijk eenvoudig. Zoals we inmiddels weten, zijn er daar op fundamenteel niveau vier van: de elektromagnetische kracht, de zwakke kernkracht, de sterke kernkracht en de zwaartekracht. Die laatste kracht levert quantumfysici ook vandaag de dag nog allerlei problemen op – meer daarover in het volgende artikel – maar van de andere drie krachten werd al snel duidelijk door welke velden ze beschreven worden. De elektromagnetische kracht was al door Feynman en zijn collega’s in detail beschreven. Het bijbehorende elektromagnetische veld is niets anders dan het veld waardoor ook lichtgolven zich voortbewegen. De bijbehorende deeltjes worden ook wel *fotonen* genoemd.

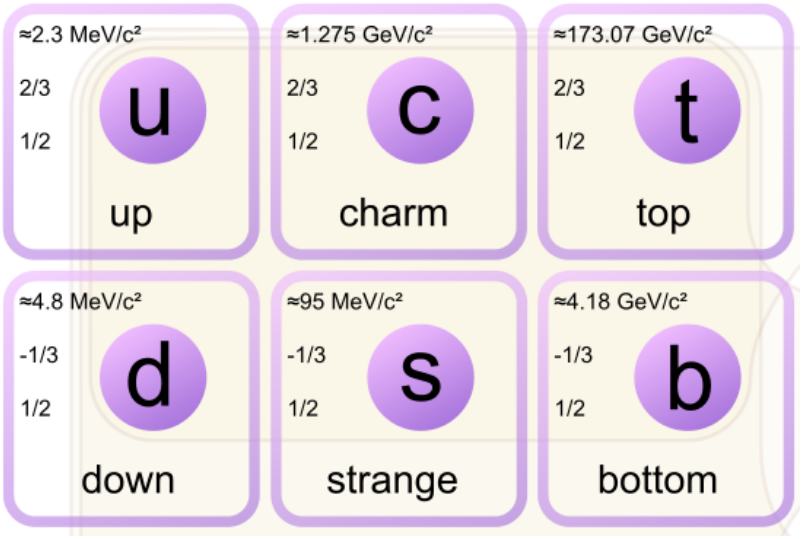
Vervolgens was het de beurt aan de zwakke kernkracht om ontleed te worden. Tegen het eind van de jaren ’60 werd de volledige quantumveldenbeschrijving hiervan gegeven door de natuurkundigen Sheldon Glashow, Abdus Salam en Steven Weinberg – een prestatie waarvoor de drie in 1979 een Nobelprijs kregen. Het bleek dat voor de juiste beschrijving van deze kracht niet één, maar maar liefst drie krachtvelden nodig waren. Er zijn dus ook drie bijbehorende deeltjes die samen de zwakke kernkracht overbrengen: die deeltjes worden het W^+, het W^- en het Z-boson genoemd.

Het begrijpen van de sterke kernkracht duurde nog grofweg een decennium langer, en was het gezamenlijk werk van een groot aantal theoretisch en experimenteel fysici. Het beeld dat uiteindelijk tegen het eind van de jaren ’70 ontstond, was dat deze kracht door maar liefst acht verschillende (maar sterk onderling samenhangende) krachtvelden wordt overgebracht. De bijbehorende acht krachtdeeltjes worden ook wel *gluonen* genoemd.

De quarks

Daarmee vormden de verschillende krachten, met uitzondering van de zwaartekracht, dus een betrekkelijk overzichtelijk geheel. Hoe zat het met de deeltjes – oftewel: de fermionische velden? Hier leek de situatie oorspronkelijk een stuk minder overzichtelijk. In de jaren ’50 en ’60 werden steeds meer nieuwe deeltjes ontdekt. Het ging daarbij met name om deeltjes die, net als bijvoorbeeld het proton en het neutron, gevoelig zijn voor de sterke kernkracht. Deze deeltjes werden gezamenlijk de *hadronen* genoemd. Het begon het erop te lijken dat het maken van een overzichtelijk model van al deze deeltjes een hopeloze onderneming was.

Gelukkig bleek deze vrees uiteindelijk ongegrond. Veel van de nieuwe “deeltjes” die gevonden werden, zijn namelijk helemaal geen fundamentele deeltjes. Het bleek uiteindelijk dat alle hadronen die gevonden waren samengestelde deeltjes zijn, die zelf weer zijn opgebouwd uit een klein aantal fundamentele bouwstenen: de *quarks*. De bekendste voorbeelden van zulke hadronen zijn zoals gezegd het proton en het neutron – de deeltjes waaruit atoomkernen bestaan. Deze deeltjes blijken te zijn opgebouwd uit twee soorten quarks, die de namen *up*– en *downquark* hebben gekregen. Een proton is opgebouwd uit twee upquarks en één downquark; een neutron is opgebouwd uit twee downquarks en een upquark.



Afbeelding 3. De quarks uit het standaardmodel

Het up- en het downquark bleken niet de enige twee types quarks te zijn. Er bleek al snel een zwaardere versie van het downquark nodig te zijn om andere nieuw ontdekte hadronen te beschrijven. Dit “neefje” van het downquark was twintig keer zo zwaar als het downquark zelf, maar verder waren alle eigenschappen van de twee deeltjes (lading, spin, enzovoort) exact hetzelfde. Dit mega-downquark werd het *strange-quark* genoemd. En al snel bleek ook het upquark een soortgelijk (maar nog zwaarder) neefje te hebben: het *charmquark*.

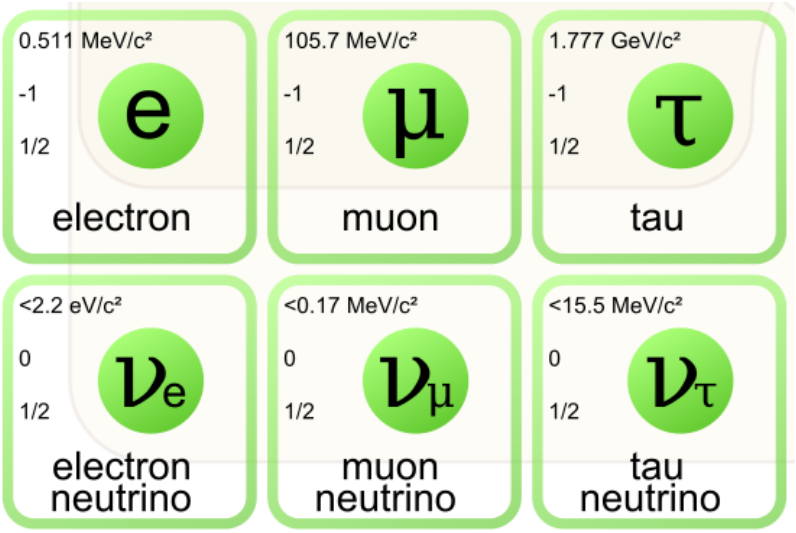
Daarmee was de “stamboom” van de quarks echter nog steeds niet compleet. Uit theoretische argumenten over het verval van deeltjes volgde dat er nog tenminste een vijfde quark moest zijn – nóg een zwaarder neefje van het downquark. Het kreeg alvast de naam *bottomquark*, en het werd in 1977 inderdaad in experimenten gevonden. Dat leidde natuurlijk onmiddellijk tot de vraag of het upquark dan ook een derde neefje (waarvoor de naam *topquark* voor de hand lag) zou hebben. Er werd algemeen aangenomen dat dit het geval zou zijn, maar het duurde nog tot 1995 voordat het enorm zware topquark daadwerkelijk in experimenten werd gevonden.

Daarmee lijkt het erop dat nu alle quarks bekend zijn. Weten we zeker dat er niet nog een vierde “familie” van neefjes van het up- en downquark is? Of zelfs een vijfde, zesde, enzovoort? Het antwoord daarop is “nee”. Het zou kunnen dat dergelijke deeltjes wel bestaan, maar zo zwaar zijn dat we ze nog niet in experimenten hebben kunnen produceren. De kans daarop lijkt echter klein. Ten eerste was het voor het bottomquark zo dat we het bestaan van het deeltje al konden voorspellen *voordat* het was waargenomen. Het deeltje

was daadwerkelijk nodig om bepaalde fysische verschijnselen te verklaren. Op dit moment is er echter geen enkele reden waarom een vierde familie van deeltjes nodig lijkt te zijn. Sterker nog: als zo'n familie wél zou bestaan, zouden we verwachten ook daarvan allerlei indirecte gevolgen in de experimenten te zien, en die zien we op dit moment niet. Vooralsnog lijkt het er dus op dat er precies drie deeltjesfamilies (of: *generaties*) zijn.

De leptonen

Daarmee zijn we er nog niet helemaal met de opsomming van alle verschillende quantumvelden. Het verhaal van de quarks ging immers over deeltjes die de sterke kernkracht voelen, maar er zijn ook deeltjes die die kracht helemaal niet voelen. Zulke deeltjes worden *leptonen* genoemd. De bekendste twee voorbeelden zijn het elektron, en het neutrino – een deeltje dat ontstaat bij radioactief verval als een neutron vervalt in een proton en een elektron.



Afbeelding 4. De leptonen uit het standaardmodel.

Ook het neutrino en het elektron blijken weer "neefjes" te hebben. Dat is niet zo vreemd: als we een neutron (dat bestaat uit up- en downquarks) kunnen laten vervallen in een proton, een elektron en een neutrino, zouden we natuurlijk hetzelfde kunnen proberen met een "super-neutron" dat bestaat uit strange- en charmquarks, of zelfs uit top- en bottomquarks. Het valt dus te verwachten dat in soortgelijke processen ook "neefjes" van het elektron en het neutrino worden gevormd, en die deeltjes blijken inderdaad te bestaan. De neefjes van het elektron heten het muon en het tau-deeltje, en de bijbehorende neutrino's hebben de

weinig geïnspireerde namen muon-neutrino en tau-neutrino gekregen.

Het Higgsdeeltje

Tenslotte is er nog één wat vreemde eend in de bijt: het Higgsdeeltje. In de jaren ’60 was een belangrijke vraag waarom de elektromagnetische kracht en de zwakke kernkracht – die in veel opzichten heel sterk op elkaar lijken – op totaal verschillende afstanden een rol spelen. Elektromagnetische krachten kunnen zich over astronomisch grote afstanden manifesteren, terwijl de zwakke kernkracht, zoals de naam al zegt, voornamelijk op subatomaire schaal een rol speelt. Wat maakt deze twee krachten zo verschillend? Een deel van het antwoord was bekend: het foton, dat de elektromagnetische kracht overbrengt, heeft geen massa, en kan daarom probleemloos enorme afstanden overbruggen. De W- en Z-bosonen die de zwakke kernkrachten overbrengen hebben echter wel een massa, en hebben daardoor veel meer moeite om grote afstanden af te leggen. Maar waarom hebben de W- en Z-bosonen een massa? Wat maakt ze zo traag?



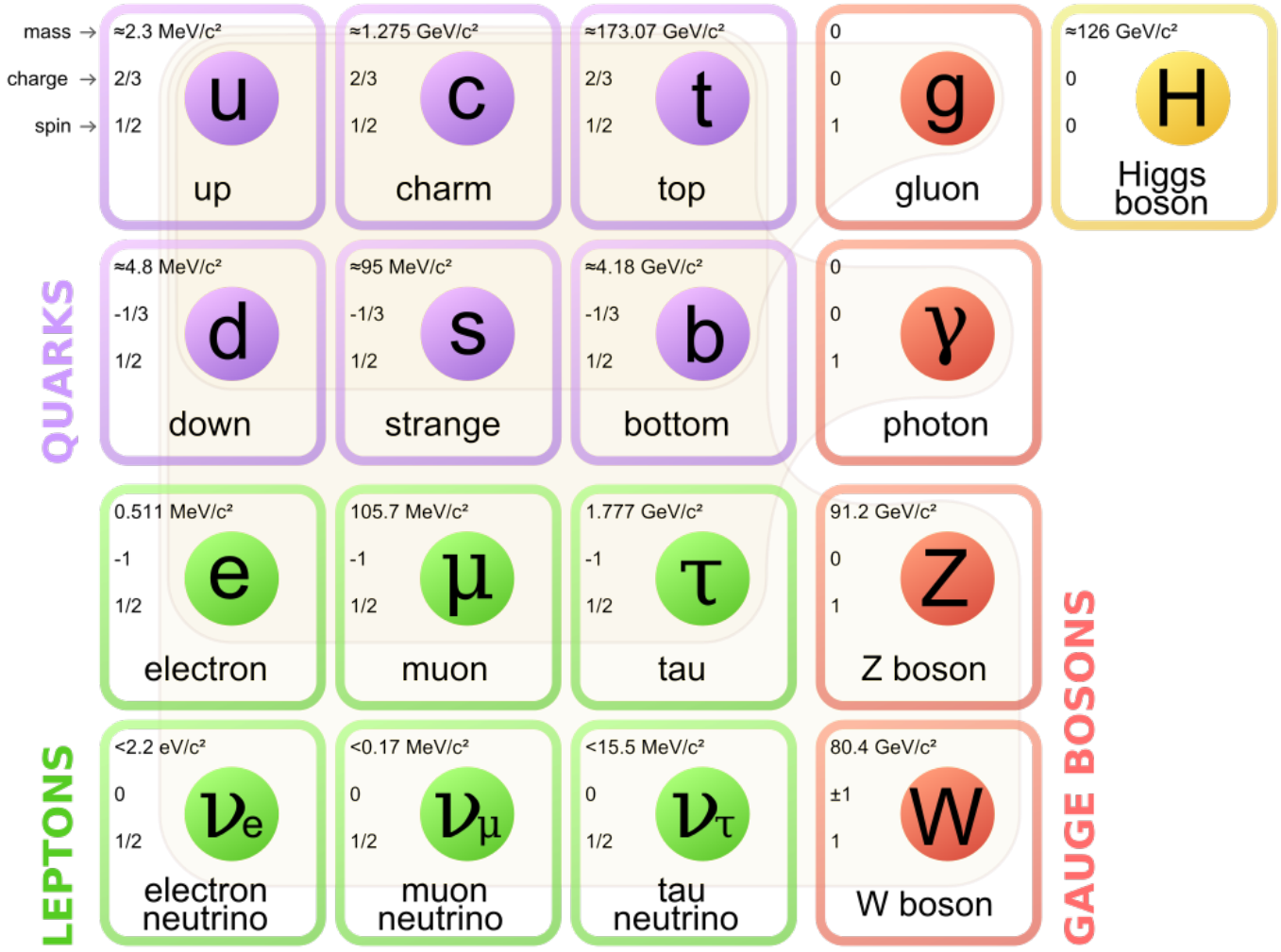
Afbeelding 5. Het Higgsdeeltje.Het laatst ontdekte deeltje uit het standaardmodel is het Higgsdeeltje.

Diverse natuurkundigen kwamen rond 1964 met het antwoord. Er moest nóg een deeltje zijn, dat een heel sterke interactie heeft met de W- en Z-bosonen, maar niet met fotonen. Die interactie kon de W- en Z-bosonen “vertragen”, wat het grote verschil met fotonen zou verklaren. Dit mechanisme, en het bijbehorende deeltje, werden naar één van de ontdekkers het Higgsmechanisme en het Higgsdeeltje genoemd. In 2012 werd ook dit (voor zover we nu weten) laatste quantumdeeltje op het CERN in Genève ontdekt.

Het standaardmodel

Daarmee hebben we een overzicht gegeven van alle “acteurs” die samen bepalen hoe het

toneelstuk van onze natuur eruitziet. In afbeelding 6 zien we al die quantumvelden (deeltjes- en krachtvelden) nog eens samen in één overzichtelijke tabel. In de tabel zijn ook wat eigenschappen van de bijbehorende deeltjes weergegeven: massa, spin, en elektrische lading. Het geheel van al deze velden (plus natuurlijk de regels volgens welke ze met elkaar wisselwerken) wordt het *standaardmodel* van de elementaire deeltjes genoemd.



Afbeelding 6. Alle deeltjes uit het standaardmodel.Afbeelding: Wikipediagebruiker MissMJ.

Is het standaardmodel zoals we dat vandaag de dag kennen compleet, of zijn er nog veel meer deeltjes in de natuur die nog niet ontdekt zijn? Het antwoord is hetzelfde als dat voor de quarks: we weten het niet zeker. Duidelijk is dat het standaardmodel in elk geval de zwaartekracht nog niet goed beschrijft, dus dat probleem moet nog opgelost te worden. Daarbuiten lijkt het standaardmodel in elk geval een consistent geheel. We zien op dit moment in de experimenten geen verschijnselen waarvoor het *nodig* is om het bestaan van nieuwe deeltjes te postuleren. Als de geschiedenis ons echter iets geleerd heeft, is het dat

we nooit moeten denken dat de natuurkunde “af” is. Het is dus zeker van belang om op zoek te blijven naar nieuwe deeltjes – wie weet op welke manier toekomstige experimenten ons nog zullen verrassen!

De bovenstaande beschrijving van de zoektocht naar het standaardmodel is erg beknopt en zeker niet bedoeld als volledige historische beschrijving. Een uitgebreidere beschrijving zou een onderwerp voor een dossier op zich zijn – wellicht verschijnt dat dossier in de toekomst op deze website. Tot die tijd kunnen we u bijvoorbeeld het erg goede boek “De bouwstenen van de schepping” van Gerard ’t Hooft aanraden, waarin de zaken uit dit artikel veel uitgebreider en uit een beter historisch perspectief beschreven worden.

Dit is het veertiende artikel uit het dossier Quantumfysica. In het vijftiende en laatste artikel beschrijven we het grootste nog openstaande probleem voor de quantumfysica: het beschrijven van de zwaartekracht.