

Quantumfysica (15): Quantumzwaartekracht

Dit is het vijftiende en voorlopig laatste artikel uit het dossier Quantumfysica. In het [veertiende artikel](#) bespraken we de quantumtheorie die bijna alle krachten en deeltjes in de natuur beschrijft: het standaardmodel.

Zoals we in de voorgaande artikelen in dit dossier uitgebreid hebben gezien, zijn de quantummechanica en de daaruit volgende [quantumveldentheorie](#) heel nuttige en succesvolle theorieën. Inmiddels, ruim een eeuw nadat de eerste quantumideeën ontstonden, zijn de theorieën grondig getest en blijken ze bijna alle verschijnselen op microscopische schaal met grote precisie te beschrijven.

Quantumzwaartekracht

Bijna alle verschijnselen? Ja, want om het in Asterix-taal te zeggen: een onderdeel van de natuurkunde blijft dapper weerstand bieden tegen een quantumbeschrijving. Dat onderdeel is de zwaartekracht. In tegenstelling tot de andere drie fundamentele natuurkrachten (elektromagnetisme, sterke kernkracht en zwakke kernkracht) is het nog altijd niet volledig gelukt om een quantumbeschrijving van de zwaartekracht te geven.



Afbeelding 1. De zwaartekracht is verreweg de zwakste kracht. De magnetische kracht van een kleine magneet kan bijvoorbeeld de zwaartekracht van de gehele aarde opheffen. Afbeelding: [Aliexpress](#).

Van de vier natuurkrachten is de zwaartekracht verreweg de zwakste. Om bijvoorbeeld in te zien dat de zwaartekracht veel zwakker is dan de magnetische kracht is het voldoende om met een magneet een metalen voorwerp zoals een sleutelbos op te tillen. Het feit dat dat mogelijk is, zegt dat de magnetische kracht van de betrekkelijk kleine magneet groter is dan de zwaartekracht die wordt uitgeoefend door de hele aarde – een bol met een straal van ruim 6.000 kilometer, en een massa van bijna 6×10^{24} kg!

Toch is op grote schaal in ons heelal de zwaartekracht de dominerende kracht. De reden daarvoor is dat zwaartekracht altijd aantrekt, terwijl de andere krachten zowel kunnen aantrekken als afstoten. In ons melkwegstelsel zijn vrijwel precies evenveel positief als negatief geladen deeltjes. Als gevolg daarvan is de netto elektrische kracht die ons melkwegstelsel uitoefent op andere sterrenstelsels vrijwel nul. De zwaartekracht van alle deeltjes in ons melkwegstelsel telt echter op, en daardoor voelt een ander sterrenstelsel wel een flinke zwaartekracht van de Melkweg.

Een overbodige theorie?

De vraag is natuurlijk: als de zwaartekracht op zo'n grote schaal pas echt een belangrijke rol speelt, is het dan überhaupt wel nodig om een quantumbeschrijving van die kracht te geven?

Zijn er wel situaties waarin we zowel de wetten van de zwaartekracht als die van de quantummechanica nodig hebben?

Het antwoord op die vraag is een overtuigend “ja”. Er zijn zeker situaties denkbaar waarin we alle vier de fundamentele krachten op microscopische schaal zouden willen beschrijven. Een voorbeeld is de natuurkunde die een rol speelde vlak na de oerknal, het ontstaan van het heelal vanuit een enorme “explosie”. Op dat moment was er gigantisch veel materie aanwezig in een heel kleine ruimte, en speelde dus ook op kleine schaal de zwaartekracht een essentiële rol. Een ander voorbeeld is de fysica van zwarte gaten. Ook daar wordt veel materie samengeperst in een kleine ruimte, en hebben we de quantumfysica van de zwaartekracht nodig om een zwart gat écht te kunnen begrijpen. Verrassend genoeg geldt dat overigens ook voor grote zwarte gaten: het feit dat een zwart gat niet statisch is maar heel langzaam straling uitzendt (de zogeheten Hawking-straling) kunnen we alleen begrijpen met behulp van de quantummechanica.



Afbeelding 2. Een zwart gat.Een “artist impression” van een zwart gat. Om de fysica in en rond deze superzware objecten te begrijpen is een theorie van de quantumzwaartekracht essentieel. Afbeelding: NASA.

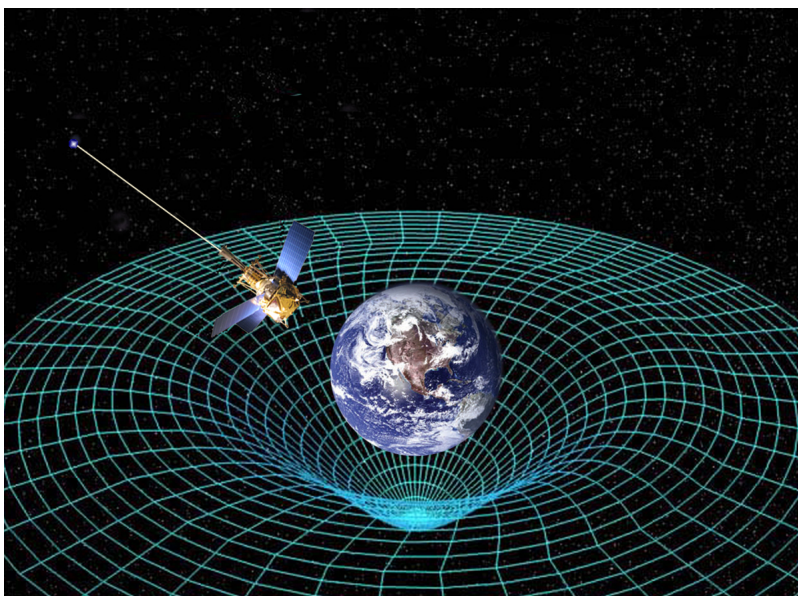
Kortom: voor een beter begrip van diverse fundamentele natuurverschijnselen is een theorie

van quantumzwaartekracht essentieel. Maar waarom is zo'n theorie eigenlijk zo lastig te formuleren? Wat maakt dat de zwaartekracht niet op dezelfde manier op microscopische schaal beschreven kan worden als de andere drie krachten?

Quantumfysica en zwaartekracht: het probleem

De reden is dat zwaartekracht – ook al op grote schaal – een totaal ander soort kracht is dan de andere drie krachten. Zoals we in het dossier over [relativiteitstheorie](#) uitgebreid hebben besproken, kunnen we zwaartekracht zien als een kromming van de ruimte – of preciezer: van de ruimte en de tijd. De reden dat een steen die we loslaten naar de aarde toe valt, is dat de aarde de ruimte om zich heen kromt, en dat de steen in een zo recht mogelijke baan door die kromme ruimte heen probeert te bewegen – en daarbij onvermijdelijk steeds dichterbij de aarde komt. Zwaartekracht is daarmee dus ook een eigenschap van de ruimte(-tijd) *zelf*: op een bepaalde plek en een bepaald moment zal elk voorwerp exact dezelfde zwaartekrachtsversnelling ondervinden.

Datzelfde is niet waar voor andere krachten. Als we vlak bij een positieve lading een andere positieve lading houden, zal die worden afgestoten, maar als we op diezelfde plek een negatieve lading houden, zal die worden aangetrokken. De elektrische kracht is dus geen eigenschap van de ruimtetijd, maar een kracht die – zoals we in eerdere artikelen hebben gezien – door een *veld* wordt overgebracht. Precies hetzelfde geldt voor de twee kernkrachten.



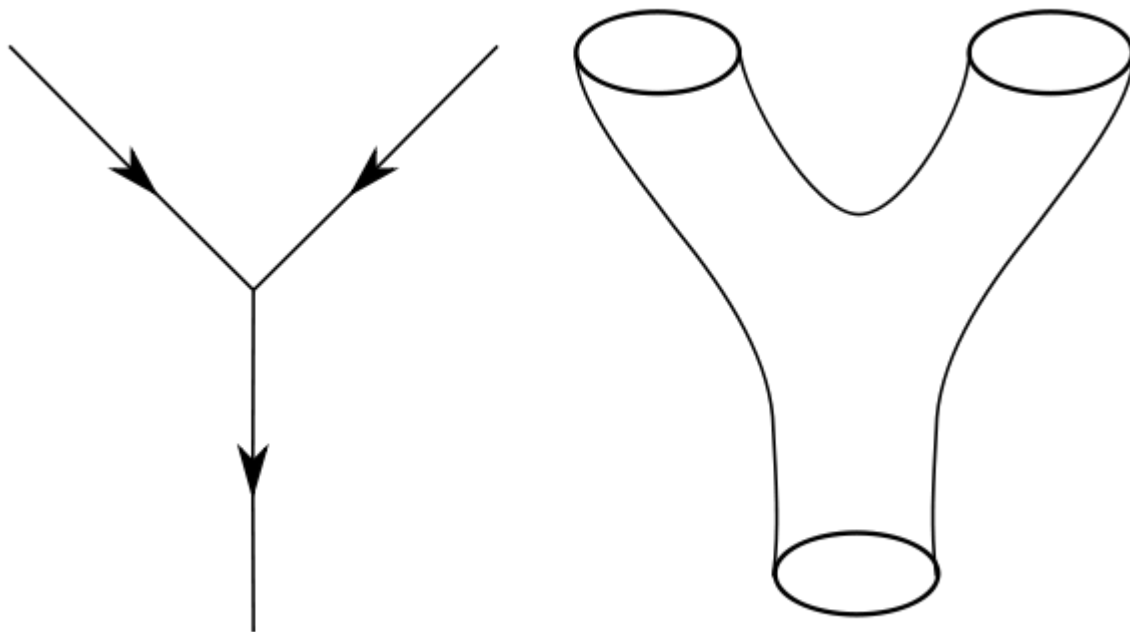
Afbeelding 3. Het zwaartekrachtsveld. De aarde kromt de ruimte (en de tijd) om zich heen, zodat satellieten in ronde banen bewegen en voorwerpen naar de aarde toe vallen. We kunnen de kromming van de ruimtetijd zien als het veld dat de zwaartekracht voortbrengt. Afbeelding: NASA.

Is er dus geen veld dat bij de zwaartekracht hoort? In zekere zin is dat er wel: we kunnen de ruimtetijd zélf (of iets wiskundiger geformuleerd: de kromming van die ruimtetijd, ook wel de *metriek* genoemd) zien als het veld dat de zwaartekracht voortbrengt. De voor de hand liggende oplossing voor het quantumzwaartekrachtsprobleem lijkt dus te zijn om de technieken van de quantumveldentheorie op de ruimtetijd zelf toe te passen, en te zien wat er gebeurt.

Helaas blijkt deze aanpak het probleem niet op te lossen. Het probleem zit hem in het begrip [renormalisatie](#), dat we in een eerder artikel bespraken. Of de renormalisatietruc werkt of niet blijkt af te hangen van de spin (grofweg de draaiing – zie het artikel over [verstrengeling](#)) van het veld of deeltje dat we beschrijven. Voor alle natuurkrachten is die spin, in slim gekozen eenheden, gelijk aan 1, maar voor het zwaartekrachtsveld (en het bijbehorende deeltje, het *graviton*) is die spin gelijk aan 2, dus twee keer zo groot. Het blijkt dat voor een deeltje met zo'n grote spin de renormalisatietruc niet meer werkt, en de berekeningen dus onzinnige, oneindig grote uitkomsten opleveren.

Mogelijke oplossingen

Al ruim een halve eeuw is de zoektocht naar oplossingen voor dit probleem in volle gang. Een beroemde suggestie voor een oplossing is de snaartheorie: een theorie die ervan uitgaat dat de elementaire deeltjes die we om ons heen zien geen puntdeeltjes zijn, maar kleine trillende snaartjes. Het blijkt dat dat idee ertoe leidt dat de Feynmandiagrammen die we in de quantumveldentheorie gebruiken een stuk “gladder” worden: zie afbeelding 4. Dit gladder worden vertaalt zich in de berekeningen in het feit dat de oneindigheden verdwijnen, waardoor renormalisatie niet meer nodig is. Op die manier blijkt het inderdaad mogelijk te zijn om een quantumtheorie van de zwaartekracht op te stellen, maar er zijn nog allerlei problemen om met diezelfde theorie ook precies de andere krachten en deeltjes in ons heelal te beschrijven. In een toekomstig dossier komen we nog uitgebreid op de snaartheorie terug.



Afbeelding 4. Van puntdeeltjes naar snaren. Links een heel eenvoudig Feynmandiagram voor een puntdeeltje: twee deeltjes botsen en vliegen als één deeltje verder. Rechts hetzelfde diagram waarbij de puntdeeltjes vervangen zijn door kleine cirkelvormige snaartjes. Het rechterdiagram is veel “gladder”, en leidt daardoor tot minder wiskundige problemen. Afbeelding: Wikipediagebruiker Kurochka.

De snaartheorie is voor veel fysici het meest aansprekende idee om het probleem met de quantumzwaartekracht op te lossen, maar er zijn nog allerlei andere ideeën, met mooie namen als loop quantum gravity, causal dynamical triangulations, canonical quantum gravity, enzovoort. Geen van deze theorieën is het echter nog gelukt om een volledig bevredigende beschrijving van de quantumzwaartekracht te geven.

De zoektocht naar een quantumtheorie van de zwaartekracht is daarmee een van de belangrijkste ondernemingen in de huidige fundamentele natuurkunde. Wie meer wil weten over deze zoektocht en over de diverse kandidaatoplossingen kan daarover in andere artikelen op deze website veel meer informatie vinden. Een goed startpunt is om meer te lezen over de belangrijkste objecten waarvoor een dergelijke theorie nodig is: zwarte gaten. Wat dat betreft is er goed nieuws: dit was weliswaar het laatste artikel uit het dossier over quantumfysica, maar vanaf volgende week verschijnt er op deze website wekelijks een artikel in een nieuw dossier, volledig gericht op dat zwarte gaten!

Dit is het vijftiende en voorlopig laatste artikel uit het dossier over Quantumfysica. Vanaf dinsdag 28 april 2015 is er op de Quantum Universe-site wekelijks een artikel te vinden in een nieuw dossier over zwarte gaten.