Symmetrie in quantumzwaartekracht

‘Symmetrie’ is een belangrijk stuk gereedschap van de theoretisch natuurkundige. Modellen zijn vaak symmetrisch, en kunnen aan de hand van die symmetrieën beter bestudeerd worden. Voor theorieën van de quantumzwaartekracht speelt symmetrie een extra belangrijke rol – want bepaalde symmetrieën blijken daar helemaal niet voor te kunnen komen!



Afbeelding 1. Een voorbeeld van symmetrie in de natuur. Foto: Leon Brooks.

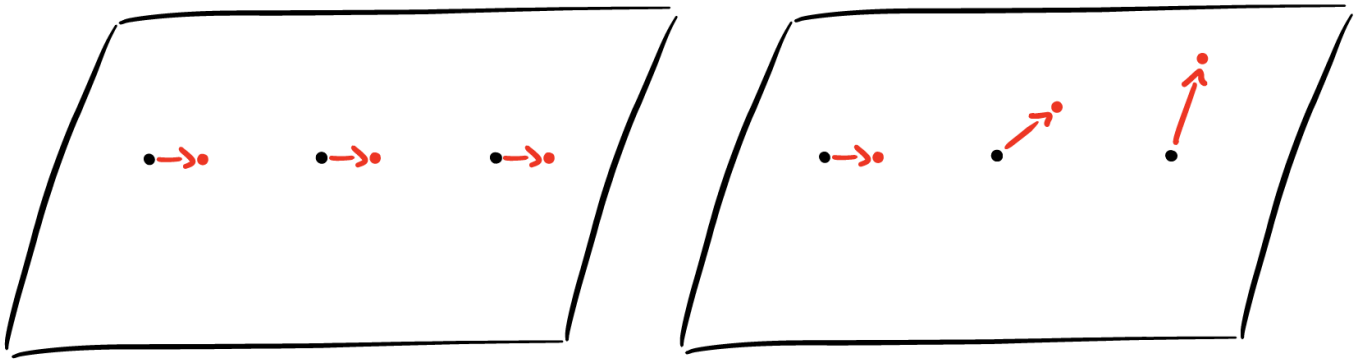
Het gebruik van symmetrieën speelt een belangrijke rol in de hedendaagse natuurkunde. Zo

leidt bijvoorbeeld symmetrie onder translaties (verplaatsingen door de ruimte) direct tot de wet voor behoud van impuls – het product van de massa en snelheid van deeltjes. Toch vermoeden theoretisch natuurkundigen dat dit soort symmetrieën, zogenaamde *globale* symmetrieën, niet voorkomen in een model van quantumzwaartekracht. In dit artikel bespreek ik wat zulke globale symmetrieën zijn, waarom ze in de quantumzwaartekracht waarschijnlijk niet voorkomen, en waarom we überhaupt vermoeden dat dit gebeurt.

Globale en lokale symmetrieën

Laat ik beginnen met uit te leggen wat precies een *globale symmetrie* is, aan de hand van een voorbeeld. Zoals eerder al gezegd kan een natuurkundig model symmetrisch zijn onder translaties: verschuivingen. Hiermee bedoelen we niet dat alle mogelijke toestanden van een systeem hieronder invariant zijn: een lege ruimte is bijvoorbeeld wél symmetrisch onder verplaatsingen, maar zodra we deeltjes toevoegen en ons verplaatsen tussen deze deeltjes zien we die deeltjes steeds vanuit een ander perspectief en ‘breken’ we dus de symmetrie. Toch kunnen zowel de lege als een gevulde ruimte toestanden van hetzelfde model zijn. Om een symmetrie aan te tonen moet je dus niet naar specifieke toestanden kijken, maar de symmetrie nagaan voor de natuurkundige *wetten* achter een model. Neem bijvoorbeeld de wetten van Newton, en zijn bekende voorbeeld van een appel van een boom valt. Het maakt voor de appel niet uit waar de boom precies staat, de appel zal op dezelfde manier naar beneden gaan vallen. De natuurwet is invariant onder verplaatsing.

Dan de vervolgvraag: wat maakt een symmetrie precies *globaal*? Het idee van een globale symmetrie is dat deze op dezelfde manier werkt op ieder punt in ruimte en op ieder moment in de tijd. Voor onze translatiesymmetrie betekent dit dat we op ieder punt in onze ruimtetijd dezelfde verplaatsing moeten toepassen. De tegenhanger van een globale symmetrie is een lokale symmetrie: de verandering mag er dan wel anders uitzien op verschillende punten in ruimtetijd. Dit betekent dat de verplaatsing dus in een andere richting, of zelfs met een andere afstand, kan worden toegepast op een ander punt in ruimtetijd. Zo’n ‘lokale verplaatsing’ is veel complexer, en dus minder vaak een symmetrie van het model!



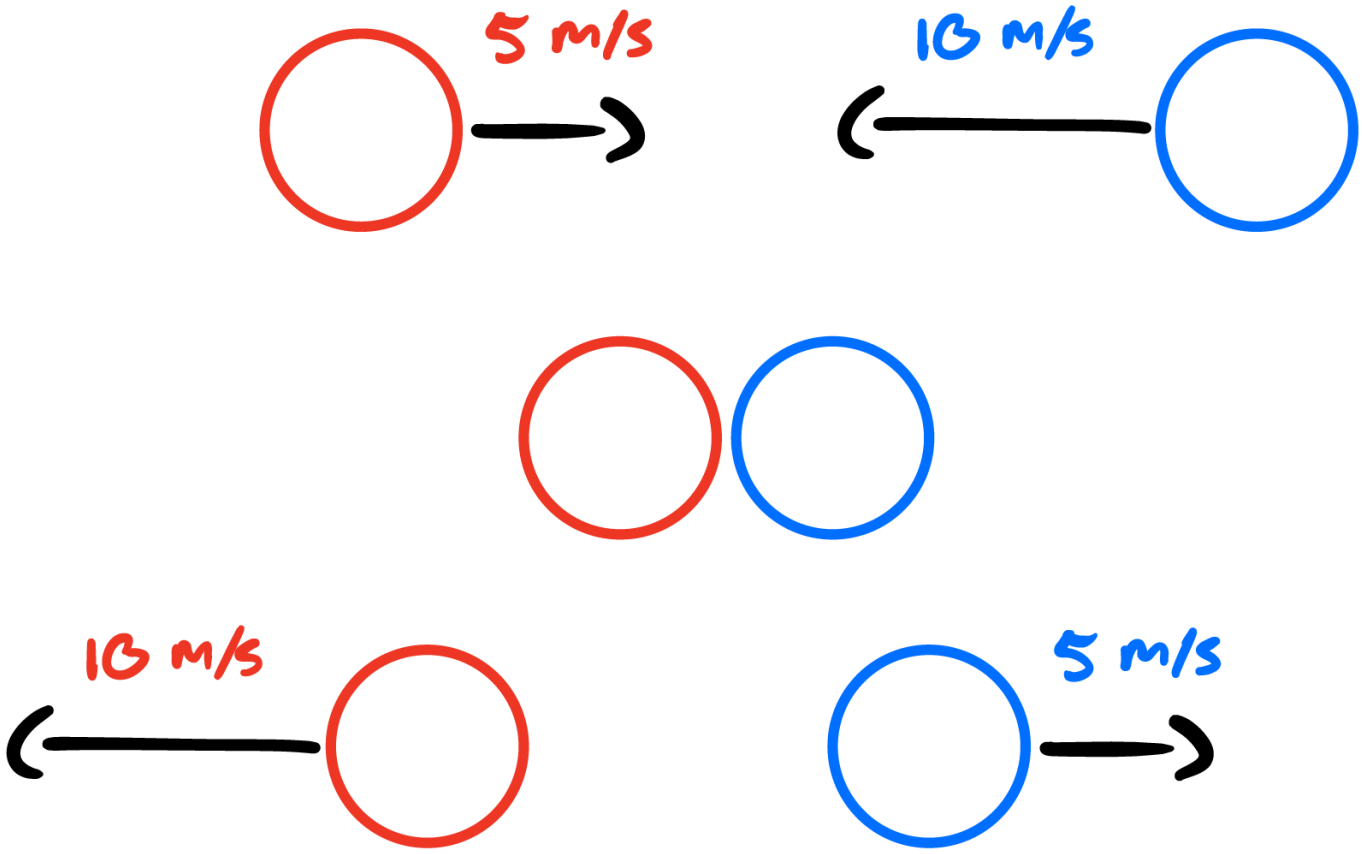
Afbeelding 2. Translaties: globaal vs. lokaal. Bij een globale translatie (links) verschuift alles op dezelfde manier; bij een lokale translatie (rechts) hangt de verschuiving van de plaats af.

Het lot van translatiesymmetrie ligt nu in de uitbreiding van de speciale relativiteitstheorie naar de algemene relativiteitstheorie. Binnen de speciale relativiteitstheorie is translatiesymmetrie nog een globale symmetrie van onze natuurkundige modellen. Algemene relativiteitstheorie, waarin ook de zwaartekracht is opgenomen, komt vervolgens tot stand door dit soort globale symmetrieën te promoveren tot een lokale symmetrie – met andere woorden: als je de speciale relativteitstheorie kent, en je wilt er een theorie van maken met ook *lokale* translatiesymmetrie vind je vanzelf de algemene relativiteitstheorie, inclusief zwaartekracht! In die zin ‘voorkomt’ (quantum)zwaartekracht dus een globale translatiesymmetrie door die te veranderen in een lokale symmetrie. Een handige vergelijking om hierbij te trekken is die met de *waarnemers* waarvoor de wetten van relativiteit gelden. Voor speciale relativiteitstheorie mag een waarnemer alleen een constante snelheid hebben (of stilstaan), terwijl binnen de algemene relativiteitstheorie een waarnemer ook mag versnellen. Dit betekent dat de snelheid van de waarnemer van punt tot punt in ruimtetijd mag verschillen, net zoals een lokale symmetrie op verschillende plekken een andere werking kan hebben.

Stelling van Noether

Een belangrijk inzicht voor globale symmetrieën werd begin jaren 1900 verkregen door Emmy Noether. Zij toonde namelijk aan dat voor iedere globale symmetrie er een bijbehorende ‘lading’ is, een grootheid die behouden moet blijven binnen een gesloten systeem. Laten we als voorbeeld weer naar translatiesymmetrie kijken. Als die symmetrie er is volgt uit de stelling van Noether dat de totale impuls – de som van de impulsen (massa maal snelheid) van alle deeltjes – behouden blijft. Dit betekent bijvoorbeeld dat, als twee

deeltjes van gelijke massa botsen, hun individuele snelheden kunnen veranderen, maar de som van de twee snelheden onveranderd moet blijven. Een resultaat dat je op de middelbare school leert, maar dat dat resultaat iets met symmetrie te maken heeft is zeer verrassend!



Afbeelding 3. Een botsing. Bij een botsing is de totale impuls – de som van snelheden maal massa's – voor en na de botsing hetzelfde. In dit voorbeeld zijn de massa's van de blauwe en rode bal hetzelfde, en is dus simpelweg de som van de snelheden onveranderd.

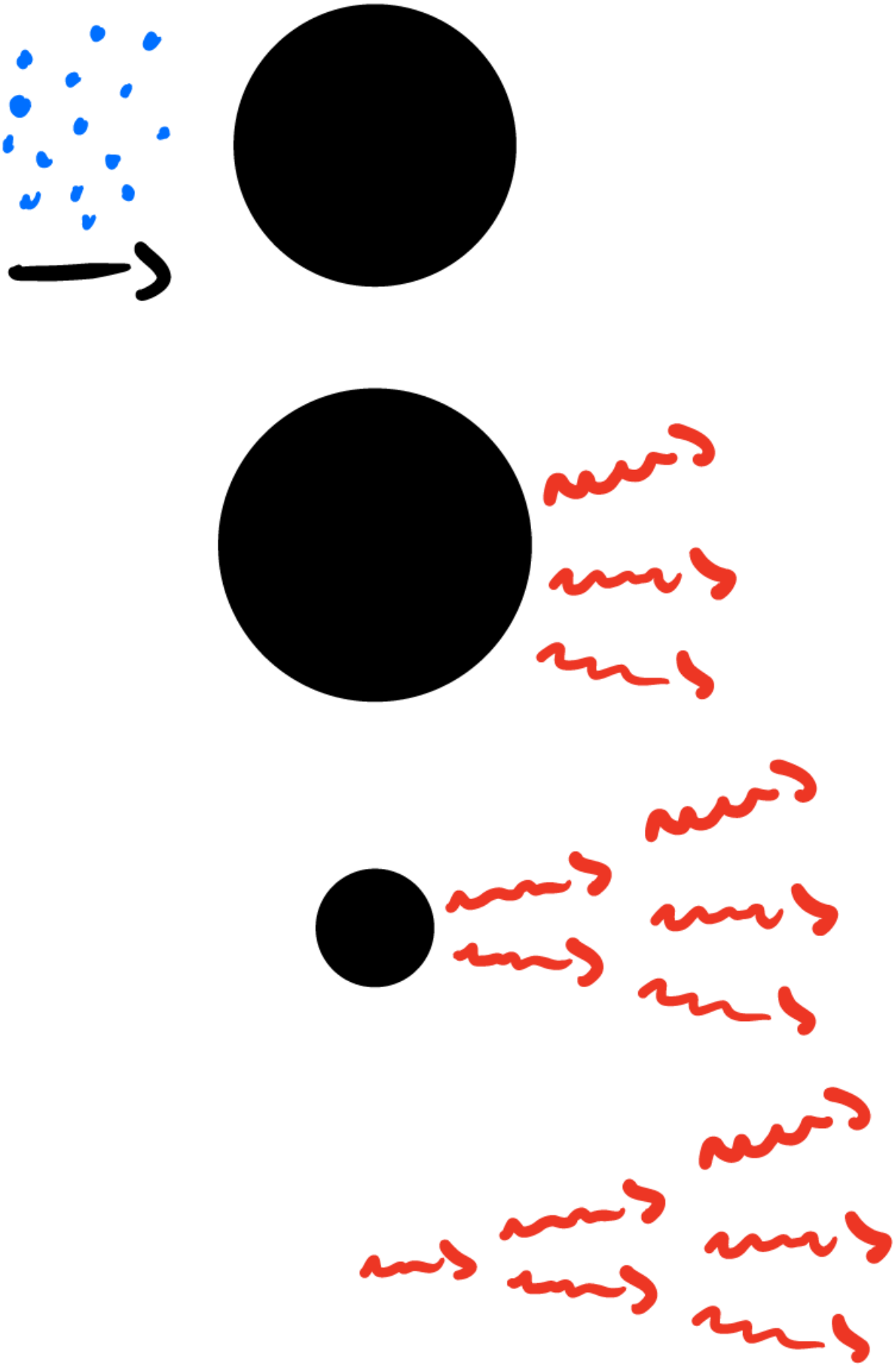
Deeltjesfysica

Globale symmetrieën komen niet alleen voor in de vorm van translaties en rotaties van onze ruimtetijd, maar ook op andere plekken binnen de theoretische natuurkunde, zoals de deeltjesfysica. De symmetrieën in de deeltjesfysica hebben een vrij abstracte oorsprong, maar de behoudenen ladingen die erbij horen volgens de stelling van Noether zijn eenvoudiger. Binnen het huidige standaardmodel van onze deeltjesfysica geldt er namelijk een behoudswet voor de aantallen van bepaalde soorten deeltjes tijdens botsingsprocessen – de zogeheten B-L-symmetrie. Die gaat over het aantal baryonen (B) minus het aantal leptonen (L) in een systeem. Baryonen zijn een speciaal soort samengestelde deeltjes zoals protonen, en leptonen zijn specifieke fundamentele deeltjes zoals elektronen. Deze B-L-

symmetrie zorgt er binnen het standaardmodel voor dat alle botsingen die deeltjes kunnen ondergaan dit verschil in aantal – B-L –behouden. Zo zou bijvoorbeeld het lichtste baryon, het proton (B=1, L=0), uiteen kunnen vallen in een pion (B=0, L=0) en een positron (B=0, L=-1), het antideeltje van het elektron. Vooraf hebben we B-L=1-0=1, en achteraf ook B-L=0-(-1)=1. Zouden we vervolgens in een deeltjesversneller een nieuw soort botsing waarnemen waarbij B-L niet behouden blijft, dan betekent dit dat we ons standaardmodel zullen moeten gaan uitbreiden met nieuwe interacties tussen de deeltjes.

Zwarte gaten

Dan rest de vraag: waarom vermoeden natuurkundigen dat globale symmetrieën niet kunnen voorkomen in modellen van quantumzwaartekracht? Dat een symmetrie als translatie lokaal wordt door te werken met algemene relativiteitstheorie is één ding, maar dat het behoud van sommige deeltjesaantallen wordt gebroken gaat een flinke stap verder. Wat zou er immers mis kunnen gaan als we de globale B-L-symmetrie niet breken met nieuwe botsingsprocessen, maar het standaardmodel gewoon laten zoals het is? Een gedachte-experiment over zwarte gaten geeft ons hier een interessante blik op. Zwarte gaten zijn namelijk precies het soort objecten waar we een model van quantumzwaartekracht voor nodig hebben: ze zijn oorspronkelijk ontdekt als oplossingen van de zwaartekrachtswetten van Einstein in de relativiteitstheorie, maar erbinnenin vinden we zulke extreme toestanden dat ook quantumeffecten heel belangrijk worden. Zwarte gaten vormen dus de ideale omgeving om ideeën over quantumzwaartekracht te testen.



Afbeelding 4. Een gedachte-experiment. Het zwarte gat, dat is opgebouwd uit deeltjes met B-L-lading, verdampt heel langzaam; uiteindelijk is er alleen nog maar straling zonder B-L-lading over.

Het idee van ons gedachte-experiment is dat we een zwart gat volgooien met baryonen (of leptonen), zodat de lading waar de B-L-symmetrie iets over zegt heel hoog wordt. Een eigenaardige eigenschap van zwarte gaten is namelijk dat we van buitenaf niet kunnen zien uit wat voor soort materie ze bestaan – we kunnen alleen de massa, de elektrische lading en het impulsmoment (de mate waarin een zwart gat draait) meten. Dit feit staat ook wel bekend als het “no hair theorem”: een zwart gat heeft geen haren – andere eigenschappen – die we kunnen zien. Voor ons experiment betekent dit dat de lading onder de B-L-symmetrie, het grote aantal baryonen dat we erin hebben gegooid, in een zekere zin verloren is gegaan.

In eerste instantie zou je misschien denken dat de baryonlading op de een of andere manier toch verborgen zit achter de horizon van het zwarte gat. Dat lijkt niet uitgesloten, want natuurkundigen hebben nog niet helemaal door hoe een model van quantumzwaartekracht precies werkt. Uit het werk van Stephen Hawking weten we daarentegen wel dat zwarte gaten niet voor altijd hoeven te bestaan: ze kunnen langzaamaan ‘leegstralen’ door middel van zogenaamde Hawkingstraling. Dit is precies het volgende punt van het gedachte-experiment: we kunnen ons zwarte gat vol met baryonlading laten leeglopen door middel van Hawkingstraling. Theoretisch natuurkundigen hebben laten zien dat deze straling neutraal geladen moet zijn onder globale symmetrieën zoals de B-L-symmetrie. Dus waar we vooraf een groot aantal baryonen hadden, hebben we achteraf alleen neutrale Hawkingstraling (B=L=0) wanneer het zwarte gat is leeggelopen. Op de een of andere manier moet quantumzwaartekracht dus binnenin het zwarte gat de globale symmetrie gebroken hebben, want anders was deze lading volgens de wet van Noether wel behouden gebleven. Hoe de quantumzwaartekrachtswetten precies onze baryonen om kunnen hebben gezet in neutrale Hawkingstraling is alleen nog niet helemaal duidelijk.

Samenvattend: het opstellen van een model voor quantumzwaartekracht stuit nog op allerlei raadsels en eigenaardigheden die we in de toekomst moeten zien op te lossen. De natuurkunde lijkt op deze schaal symmetrieën te voorkomen die we tot nog toe juist als basisprincipes in onze modellen hebben gebruikt. Hoe dit precies in zijn werking gaat is nog niet helemaal duidelijk: aan de kant van de relativiteitstheorie promoveert die symmetrieën

van globale tot lokale eigenschappen, terwijl de theorie voor de deeltjesfysica de bijbehorende behoudswetten lijkt te breken binnen in zwarte gaten. Wellicht dat deeltjesversnellers zoals de Large Hadron Collider in Genève ons binnenkort meer duidelijkheid kunnen geven door nieuwe botsingsprocessen waar te nemen, maar voorlopig lijkt het lot van globale symmetrieën in de quantumzwaartekracht niet heel rooskleurig.