Relativiteit (10): Het equivalentieprincipe

Dit is het tiende artikel uit het dossier Relativiteitstheorie. In het negende artikel beschreven we de formule $E=mc^2$, en de snelheidsbeperkingen die uit die formule volgen.

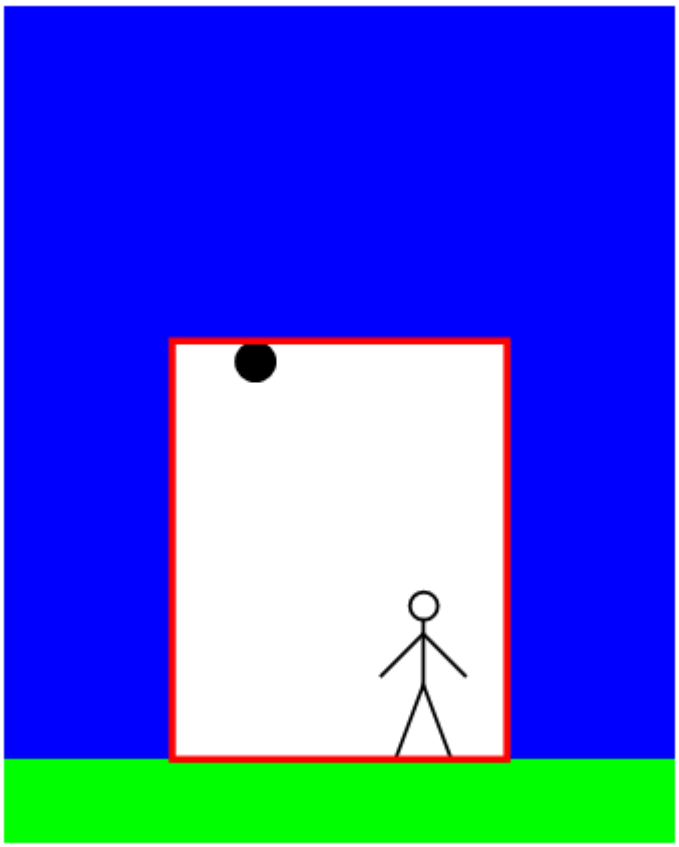
Bij het beschrijven van de tweelingparadox zagen we dat de relativiteitstheorie, zoals we die tot nu toe beschreven hebben, zich voornamelijk bezighoudt met *eenparig bewegende* waarnemers: waarnemers die ten opzichte van elkaar met een constante snelheid bewegen. De vraag ligt natuurlijk voor de hand hoe we meer algemene situaties beschrijven. Hoe ervaart iemand de ruimtetijd als hij een willekeurige versnelde of vertraagde beweging maakt?

Het kostte Einstein zo'n tien jaar om ook deze vraag te beantwoorden. Zijn artikel over de relativiteit van eenparig bewegende waarnemers – de zogenaamde *speciale* relativiteitstheorie – verscheen in 1905. Pas in 1915 verscheen de opvolger van dit artikel, waarin hij de relativiteit van willekeurige waarnemers beschreef: de *algemene* relativiteitstheorie. Verrassenderwijs kwam hij daarbij een heel nieuw verschijnsel tegen: de zwaartekracht.

De basis voor de algemene relativiteitstheorie ligt, net als die van de speciale relativiteitstheorie, in een heel eenvoudig principe. Het resultaat van de zwaartekracht is, zoals we merken wanneer we bijvoorbeeld een glas laten vallen, dat voorwerpen in de richting van zware massa's zoals de aarde versneld worden. Dat versnellen gebeurt natuurlijk alleen zolang de voorwerpen niet worden tegengehouden. Zodra het versnellende glas de grond bereikt komt het weer tot stilstand, meestal met flink wat scherven tot gevolg.

We "voelen" de zwaartekracht dus eigenlijk pas als die kracht wordt tegengewerkt. Wanneer wij over het aardoppervlak lopen, voelen we ons "zwaar" omdat het lijkt alsof de grond ons omhoog probeert te duwen – hoewel we natuurlijk eigenlijk zelf naar die grond toe worden getrokken. Een bungyjumper die van een brug af springt, is in vrije val en voelt de

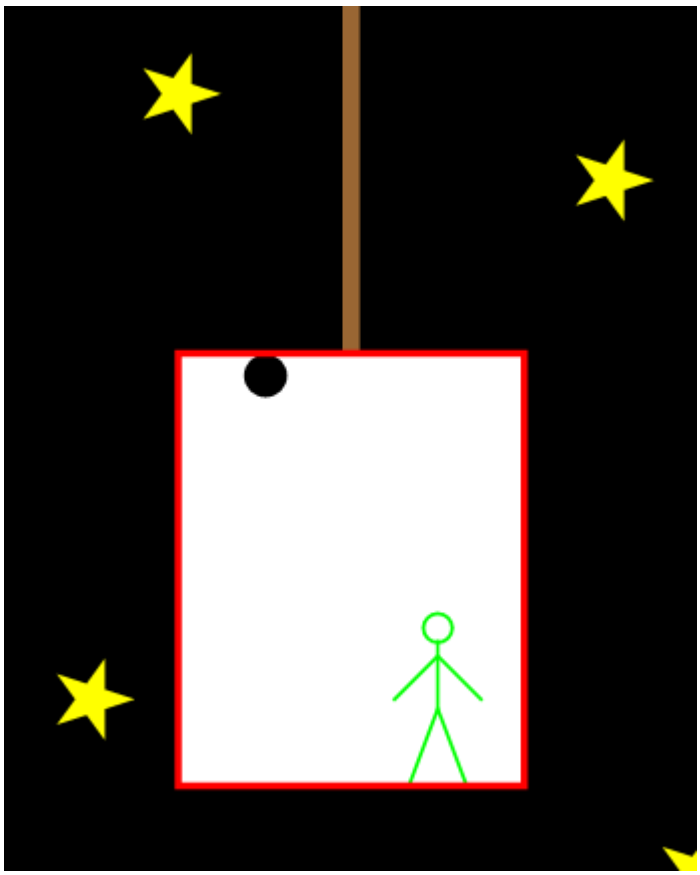
zwaartekracht helemaal niet. (Al wordt hij intussen natuurlijk wel door die zwaartekracht versneld.)



Afbeelding 1. Het equivalentieprincipe.Een waarnemer in een stilstaande lift op aarde ziet een bal vallen.

Zwaartekracht ervaren we dus als een “druk omhoog” van het aardoppervlak. Maar er is nog een situatie waarin we een soortgelijke ervaring hebben: de situatie waarin er daadwerkelijk een druk omhoog is, omdat de vloer onder ons omhoog versnelt – met andere woorden: in een lift. Als een lift flink omhoog versnelt, voelen we ons “zwaarder worden”: de zwaartekracht die we toch al voelen, wordt nog eens versterkt door het omhoog versnellen van de liftbodem.

Laten we nu eens de volgende twee situaties vergelijken. In de eerste situatie – zie afbeelding 1 – sluiten we iemand op in een geblindeerde lift die op het aardoppervlak staat. Deze persoon mag in die lift allerlei experimenten doen, en zo bijvoorbeeld de sterkte van het zwaartekrachtsveld meten. Hij zal uitvinden dat zaken met de zwaartekrachtsversnelling, zo’n 9,8 m/s^2, omlaag worden getrokken.



Afbeelding 2. Het equivalentieprincipe.Een waarnemer in een versnelde lift in de ruimte ziet de zwevende bal vanuit zijn perspectief versneld omlaag vallen.

In de tweede situatie (zie afbeelding 2) sluiten we iemand op in een geblindeerde lift die ver van de aarde door het heelal beweegt, en dus geen zwaartekracht van de aarde ondervindt. Als we verder niets zouden doen, zou er op voorwerpen in de lift dus geen enkele kracht werken. Ze zouden, net als astronauten in een ruimteschip, vrij door de ruimte in de lift zweven. Nu geven we de lift echter een versnelling omhoog mee: een versnelling van precies 9,8 m/s^2. De liftbodem wordt dus omhoog versneld naar de zwevende voorwerpen toe: de waarnemer in de lift voelt zich omhoog gedrukt worden, en ziet ten opzichte van hemzelf de voorwerpen in de lift met 9,8 m/s^2 *omlaag* versneld worden. Hij lijkt dus exact hetzelfde te ervaren als de eerste waarnemer, in de lift op aarde!

We kunnen ons nu afvragen of de twee waarnemers een experiment kunnen doen waarmee ze het verschil in hun situaties kunnen bepalen. Merk op dat deze vraag heel erg lijkt op een soortgelijke vraag die we in de speciale relativiteitstheorie stelden. Daar vroegen we ons af of twee *eenparig* bewegende waarnemers een experiment kunnen doen waarmee ze kunnen

vaststellen dat de ene waarnemer stilstaat en de ander beweegt. Het antwoord was in dat geval dat zo'n experiment niet bestaat (het relativiteitsbeginsel) en dat "stilstand" en "eenparige beweging" dus niet van elkaar te onderscheiden zijn.

In dit geval is het antwoord hetzelfde: de waarnemers in de twee liften kunnen geen enkel experiment doen om hun situaties van elkaar te onderscheiden. (De kleine lettertjes: de waarnemer op aarde zou, als hij heel erg zijn best doet, kunnen vaststellen dat alles naar het centrum van de aarde wordt versneld, en dat voorwerpen links in de lift dus in een iets andere richting worden versneld dan voorwerpen rechts in de lift. Om de situaties helemaal equivalent te maken zouden we de experimenten moeten doen in een parallel zwaartekrachtsveld, en niet in een radieel zwaartekrachtsveld zoals de aarde dat produceert.) Net als in het geval van de speciale relativiteitstheorie verhief Einstein deze observatie tot een principe: als zwaartekracht en versnelling niet van elkaar te onderscheiden zijn, dan moeten de twee eigenlijk beschrijvingen zijn van precies hetzelfde natuurkundige verschijnsel. Zwaartekracht en versnelling zijn eigenlijk precies hetzelfde! Dit beginsel wordt het *equivalentieprincipe* genoemd.

In het volgende artikel zullen we zien hoe Einstein op dit eenvoudige principe zijn algemene relativiteitstheorie baseerde, en daarmee beschreef hoe alle waarnemers, ook versnelde, de ruimtetijd ervaren.

Dit is het tiende artikel uit het dossier Relativiteitstheorie. In het elfde artikel zien we hoe Einstein ontdekte dat ruimtetijd ook gekromd kan zijn, en hoe dit leidt tot zwaartekracht.

Afbeelding blokkenschema: een gravure waarop te zien is hoe Elisha Otis zijn veiligheidssysteem voor liften demonstreert. Auteur onbekend.