



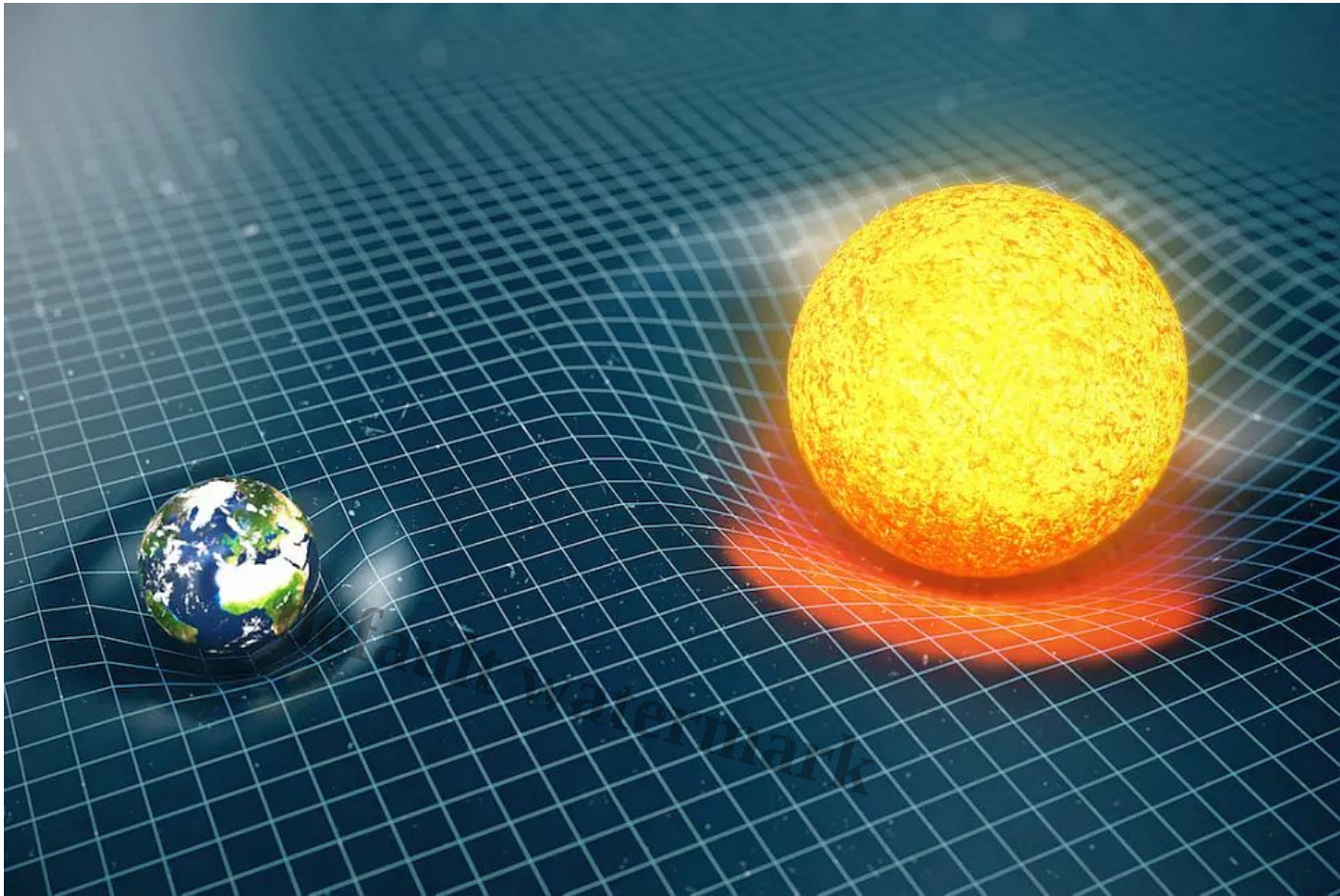
Wat is Zwaartekracht?

Beschrijving

Van de fundamentele krachten in het universum domineert er maar één op elk moment: de zwaartekracht.

Het houdt ons dicht bij de grond, pakt ballen uit de lucht en geeft onze spieren iets om tegen te strijden. Kosmisch gezien is de zwaartekracht net zo consequent aanwezig. Van het instorten van waterstofwolken tot sterren, tot het aan elkaar lijmen van sterrenstelsels, de zwaartekracht vertegenwoordigt een van de weinige spelers die de grote lijnen van de evolutie van het universum bepalen.

In sommige opzichten is het verhaal van de zwaartekracht ook het verhaal van de natuurkunde, waarbij enkele van de grootste geleerden beroemd werden door de kracht te definiëren. Maar zelfs na meer dan 400 jaar studie ligt de raadselachtige kracht nog steeds aan de basis van enkele van de grootste mysteries van de natuurkunde.



Zwaartekracht zoals een tekenaar het ziet

Zwaartekracht als universele kracht

Tegenwoordig kennen wetenschappers vier krachten â?? dingen die het ene object naar (of van) het andere object aantrekken (of afstoten):

- de sterke,
- de zwakke,
- de elektromagnetische en
- de zwaartekracht.

De sterke kracht en de zwakke kracht werken alleen binnen de centra van atomen. De elektromagnetische kracht regeert objecten met overtollige lading (zoals elektronen, protonen en sokken die over een pluizig tapijt schuifelen), en de zwaartekracht stuurt objecten met massa.

De eerste drie krachten zijn grotendeels aan de aandacht van de mensheid ontsnapt, maar mensen hebben al heel lang gespeculeerd over de zwaartekracht, die op alles inwerkt, van regendruppels tot kanonskogels. Oude Griekse en Indiase filosofen merkten op dat objecten van nature naar de grond bewogen, maar het zou een flits van inzicht van Isaac Newton vergen om de zwaartekracht te verheffen van een ondoorgrondelijke neiging van objecten tot een meetbaar en voorspelbaar fenomeen van aantrekking.



Isaac Newton (1643-1727)

Newtons gedachtegang, die openbaar werd in zijn verhandeling *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* uit 1687, was om te beseffen dat elk object in het universum $\hat{=}$ van een zandkorrel tot de grootste sterren $\hat{=}$ aan elk ander object trok.

Dit idee verenigde gebeurtenissen die totaal niets met elkaar te maken leken te hebben, van appels die op de aarde vielen (hoewel het waarschijnlijk niet tot zijn doorbraak leidde, Newton werkte wel in de buurt van een appelboom) tot de planeten die rond de zon draaien. Hij voegde ook cijfers toe aan de aantrekkingskracht: door de massa van $\hat{\otimes}$ object te verdubbelen, wordt de aantrekkingskracht twee keer zo sterk, stelde hij vast, en door twee objecten twee keer zo dicht bij elkaar te brengen, verviervoudigt hun wederzijdse aantrekking. Newton verpakte deze idee $\hat{\otimes}$ in zijn universele wet van de zwaartekracht.

Zwaartekracht als de geometrie van de ruimte

Newtons beschrijving van de zwaartekracht was nauwkeurig genoeg om het bestaan van Neptunus¹ in het midden van de 19e eeuw te ontdekken, voordat iemand het kon zien, maar op basis van schijnbare aantrekkingskrachten. Maar de wet van Newton is niet perfect.

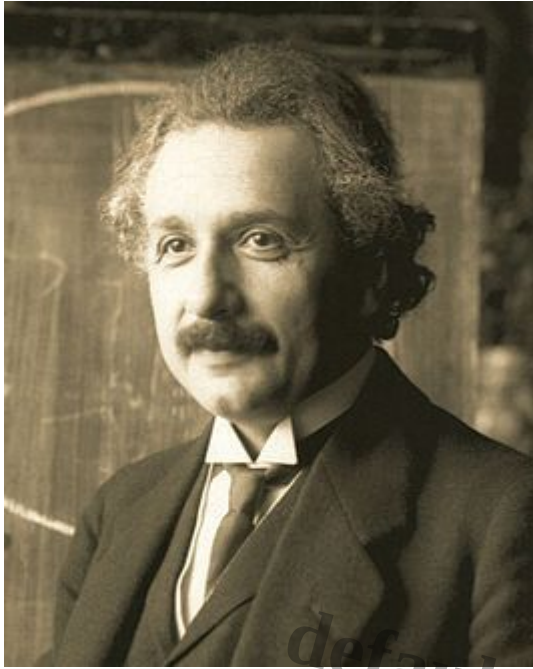
In de 19e eeuw merkten astronomen dat de ellips die door de baan van Mercurius werd getekend, sneller rond de zon bewoog dan de theorie van Newton voorspelde, wat duidt op een kleine discrepantie tussen zijn wet en de werkelijke natuurwetten. Volgens Newton werd het wiebelen van Mercurius veroorzaakt door de aantrekkingskracht van een andere planeet. Ofwel *Vulcan* $\hat{=}$ de zogenaamde $\hat{=}$ andere $\hat{\bullet}$ planeet $\hat{=}$ werd voor het eerst waargenomen in 1859; bevestigd door de grootste astronoom van de dag, *Urbain Le Verrier*; en geprezen door *The New York Times* als een van de grote ontdekkingen van de eeuw. Het probleem was echter dat *Vulcan* niet bestond².



Urbain Le Verrier (1811-1877)

De puzzel werd uiteindelijk opgelost door de algemene relativiteitstheorie van *Albert Einstein*, gepubliceerd in 1915. Het verhaal gaat als volgt: Einstein bereidt de derde van vier artikelen voor die hij levert aan de Pruisische academie, en hij maakt een berekening om te zien wat zijn nieuwe theorie voorspelt voor de baan van Mercurius. Zijn nieuwe theorie geeft correct weer wat astronomen de tafel voor Mercurius noemen, en beschrijft nauwkeurig hoe de planeet rond de zon beweegt.

Einstein vertelt vrienden hierover in de meest opgewonden bewoordingen. Hij zei dat hij hartkloppingen voelde en dat hij zo opgewonden was dat hij drie dagen niet kon werken, want hij was zo overweldigd door vreugde.



Albert Einstein (1879-1955)

Voordat Einstein zijn baanbrekende theorie publiceerde, wisten natuurkundigen hoe ze de zwaartekracht van een planeet moesten berekenen, maar hun begrip van waarom de zwaartekracht zich zo gedroeg, was weinig verder gekomen dan dat van de filosofen uit de oudheid. Deze wetenschappers begrepen dat alle objecten alle andere objecten aantrekken met een onmiddellijke en oneindig ver reikende kracht, zoals Newton had gepostuleerd, en veel natuurkundigen uit het Einstein-tijdperk lieten het daarbij.

Maar terwijl hij aan zijn speciale relativiteitstheorie werkte, had Einstein vastgesteld dat niets onmiddellijk kon reizen, en dat de zwaartekracht geen uitzondering zou moeten zijn.

Eeuwenlang behandelden natuurkundigen de ruimte als een leeg kader waartegen gebeurtenissen zich afspeelden. Het was absoluut, onveranderlijk en bestond â?? in geen enkele fysieke zin â?? echt. Algemene relativiteit promoveerde ruimte, en ook tijd, van een statische achtergrond tot een substantie die enigszins leek op de lucht in een kamer. Einstein was van mening dat ruimte en tijd samen de structuur van het universum vormden, en dat dit â??ruimtetijdâ??-materiaal kon uitrekken, comprimeren, draaien en alles erin meeslepen.

Einstein suggereerde dat de vorm van ruimtetijd de oorzaak is van de kracht die we ervaren als zwaartekracht. Een concentratie van massa (of energie), zoals de aarde of de zon, buigt de ruimte eromheen, zoals een rots de stroom van een rivier buigt. Wanneer andere objecten in de buurt komen, volgen ze de kromming van de ruimte, zoals een blad een werveling rond de rots kan volgen (hoewel deze metafoor niet perfect is omdat, althans in het geval van planeten die rond de zon draaien, de ruimtetijd niet â??vloeitâ?•.

We zien planeten draaien en appels vallen omdat ze paden volgen door de vervormde vorm van het universum. In alledaagse situaties komen die trajecten overeen met de kracht die de wet van Newton voorspelt.

Einsteins veldvergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie, een verzameling formules die illustreren hoe materie en energie de ruimtetijd vervormen, werden geaccepteerd toen ze met succes

de veranderingen in de baan van Mercurius voorspelden, alsook het buigen van sterlicht rond de zon tijdens een zonsverduistering in 1919.

Zwaartekracht als ontdekkingsinstrument

De moderne beschrijving van de zwaartekracht voorspelt zo nauwkeurig hoe massa's op elkaar inwerken dat het een gids is geworden voor kosmische ontdekkingen.

De Amerikaanse astronomen *Vera Rubin* en *Kent Ford* merkten in de jaren zestig op dat sterrenstelsels snel genoeg lijken te draaien om van sterren af te spinnen, zoals een hond waterdruppels afschudt. Maar omdat de sterrenstelsels die ze bestudeerden niet uit elkaar wervelden, leek iets hen te helpen om bij elkaar te blijven.



Vera Rubin (1928-2016)

De grondige observaties van *Rubin* en *Ford* leverden sterk bewijs ter ondersteuning van de eerdere theorie van de Zwitserse astronoom *Fritz Zwicky*, voorgesteld in de jaren dertig van de vorige eeuw, dat een onzichtbare verscheidenheid aan massa sterrenstelsels in een nabijgelegen cluster versnelde. De meeste natuurkundigen vermoeden nu dat deze mysterieuze *“donkere materie”* de ruimtetijd voldoende vervormt om sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels intact te houden. Anderen vragen zich echter af of de zwaartekracht zelf harder zou kunnen trekken op de schaal van een melkwegstelsel, in welk geval zowel de vergelijkingen van Newton als die van Einstein moeten worden aangepast.

Aanpassingen aan de algemene relativiteitstheorie zouden inderdaad delicaat moeten zijn, aangezien onderzoekers onlangs zijn begonnen met het detecteren van een van de meest subtiële voorspellingen van de theorie: het bestaan van zwaartekrachtgolven, of rimpelingen in ruimtetijd, veroorzaakt door de versnelling van massa's in de ruimte. Sinds 2016 heeft een onderzoekssamenwerking met drie detectoren in de Verenigde Staten en Europa meerdere zwaartekrachtgolven gemeten die door de aarde gaan. Er zijn meer detectoren onderweg, waarmee een nieuw tijdperk van de astronomie wordt

ingeluid, Een tijdperk waarin onderzoekers verre zwarte gaten en neutronensterren bestuderen â?? niet door het licht dat ze uitstralen, maar door hoe ze met het weefsel van de ruimte rommelen wanneer ze botsen.

¹ 23 september 1846. De planeet Neptunus â?? nu door de meeste astronomen beschouwd als de buitenste grote planeet in ons zonnestelsel â?? werd op deze datum ontdekt met behulp van wiskunde. *Johann Gottfried Galle*, *Urbain Jean Joseph Le Verrier* en *John Couch Adams* werkten allemaal onafhankelijk om deze planeet te helpen ontdekken in 1846. Hun afzonderlijke werk om Neptunus te vinden leidde tot een internationaal geschil over wie de ontdekking van de verste planeet van ons zonnestelsel moest worden toegeschreven.

Neptunus is niet te zien zonder telescoop. De ontdekking kwam echter niet alleen door het gebruik van een telescoop. Het kwam uit de analyse van astronomen van gegevens met betrekking tot de baan van Uranus. Men merkte discrepanties op in de waargenomen positie van Uranus in tegenstelling tot de voorspelde positie; de planeet was niet helemaal daar waar hij wiskundig had moeten zijn.

2 De eerste waarneming van *Vulcan* werd gedaan door de Franse amateurastronoom *Edmond Modeste Lescarbault* op 26 maart 1859 in het dorp Orgeres-En-Beauce.

Datum aangemaakt

2022/01/31