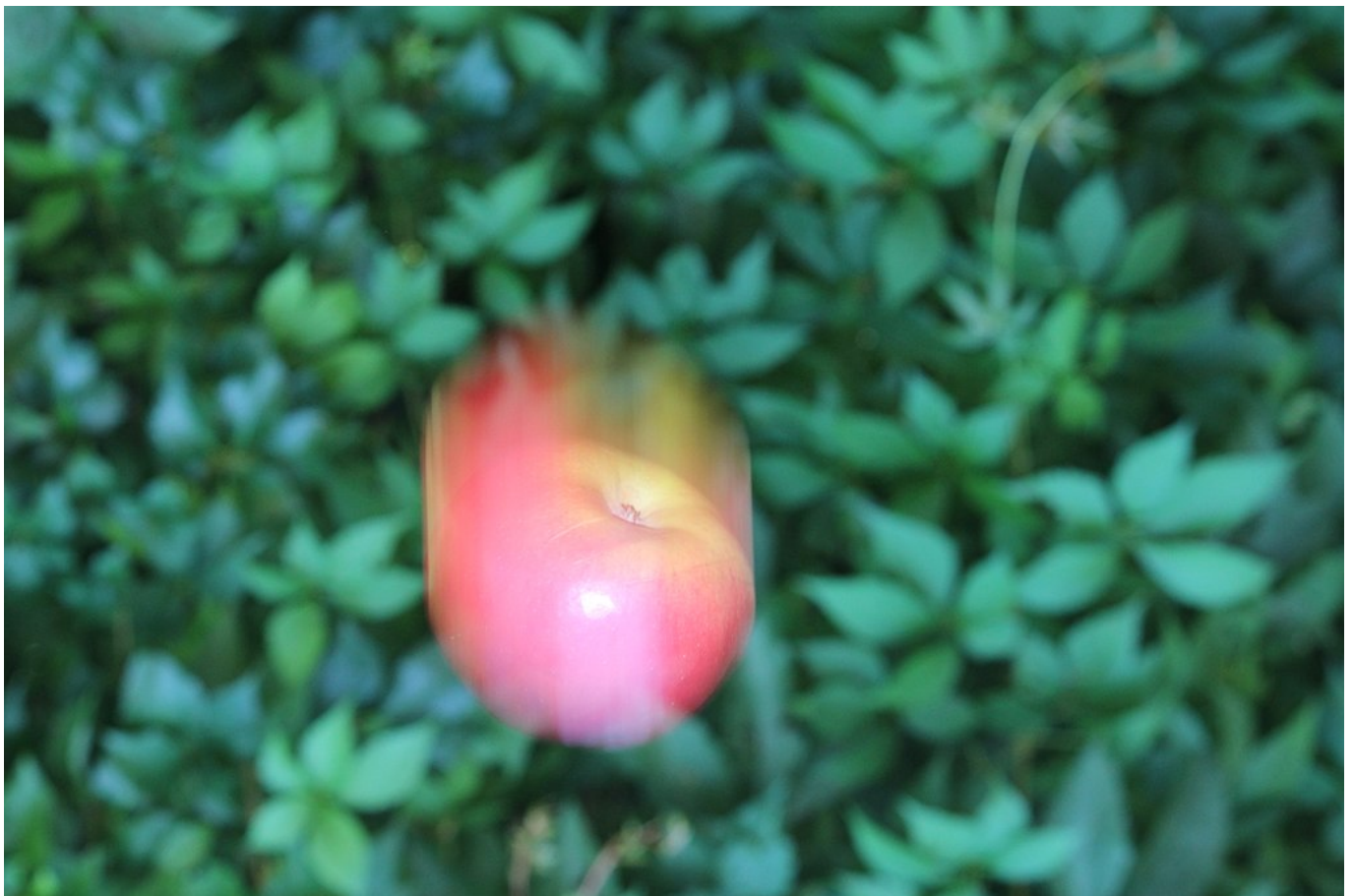


Waarom valt Einsteins appel?

Einsteins manier om de zwaartekracht te beschrijven wordt soms uitgebeeld met behulp van een elastisch doek, uitgerekt wordt door een zware massa. Dat beeld van de relativiteitstheorie is echter wat kort door de bocht. Gerben Oling legt uit hoe het nu precies zit met die 'kromme ruimtetijd'.



Afbeelding 1. Een vallende appel. Newton zou op zijn zwaartekrachtwet zijn gekomen door een vallende appel. Hoe zou Einstein diezelfde valbeweging beschrijven? Afbeelding: [Zátonyi Sándor](#).

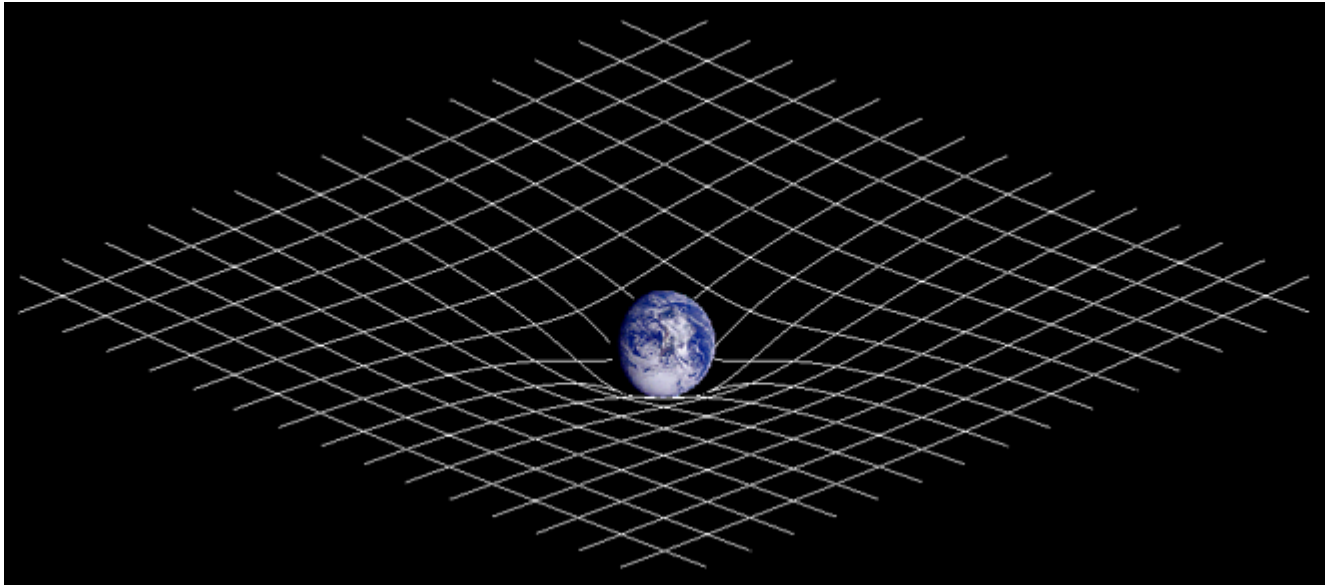
Een eeuwenoud verhaal vertelt hoe de beroemde natuurkundige Isaac Newton op een dag onder een appelboom zat, toen zijn mijmeringen bruusk verstoord werden doordat er een appel van de boom met een stevige plof op zijn hoofd viel. Hierna richtte Newton zijn overpeinzingen op wat hij net ervaren had: waarom viel de appel? Welk natuurkundig

principe zit daarachter? Dit zou hem volgens de legende uiteindelijk geleid moeten hebben tot zijn universele zwaartekrachtswet, waarmee hij de kracht kon beschrijven die twee objecten (zoals een appel en de aarde) als gevolg van hun massa op elkaar uitoefenen.

Dit verhaal heeft alleen één groot probleem, en dat is niet eens per se dat het misschien te mooi is om waar te zijn. (Het verhaal komt bij [bij Newton zelf vandaan](#), maar dat de appel op zijn hoofd viel is er waarschijnlijk bij bedacht.) Nee, de zwaartekracht bestaat niet! In de vorige eeuw werd Newtons zwaartekrachtswet vervangen door Einsteins algemene relativiteitstheorie. In deze theorie valt een appel echter niet naar de grond doordat de aarde er een kracht op uitoefent, maar doordat de massa van de aarde de [ruimtetijd doet krommen](#), waardoor de appel steeds sneller naar de aarde beweegt.

Einsteins theorie is tot op de dag van vandaag met vlag en wimpel geslaagd voor alle experimentele beproevingen. Echt simpel is zijn beschrijving echter niet, zoals de vorige alinea misschien al liet zien. Het fundamentele idee, dat de kromming van ruimte en tijd de beweging van objecten zoals een appel beïnvloedt op een manier die we waarnemen als zwaartekracht, is echter veel te mooi om het verborgen te laten blijven achter een berg wiskundige vergelijkingen.

Daarom zijn er in de afgelopen eeuw nieuwe verhalen bedacht om Einsteins ideeën toegankelijker te maken. De eerder genoemde kromming wordt vaak geïllustreerd aan de hand van een elastisch doek, waar bijvoorbeeld een voetbal op geplaatst wordt. Hierdoor kromt het doek en zal een licht object dat over het doek gerold wordt, zoals een pingpongbal, 'aangetrokken' worden door de zware voetbal. Net zoals de appel naar de aarde valt, beweegt zo'n pingpongbal naar het zwaardere object.



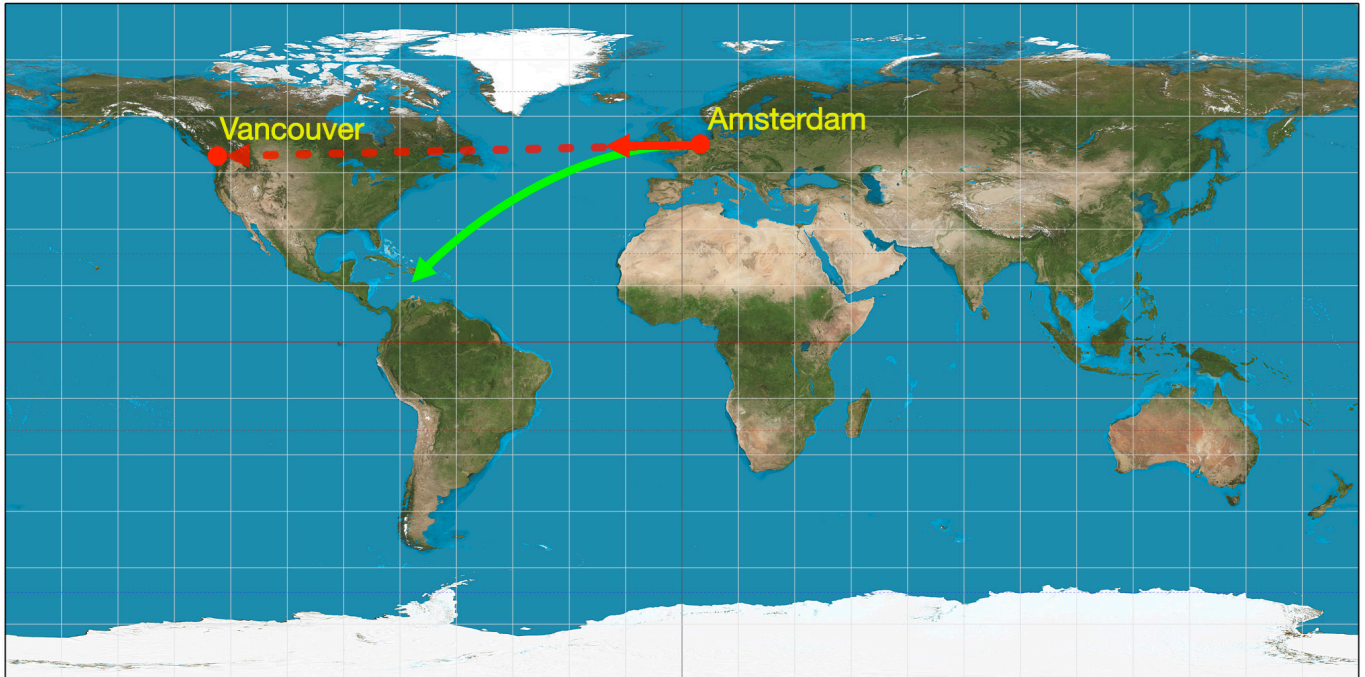
Afbeelding 2. Kromme ruimtetijd? Het gebruikelijke beeld van ruimtetijd als een ‘gekromd doek’ heeft zo zijn problemen. Afbeelding: [Johnstone](#).

Dit verhaal heeft echter last van hetzelfde probleem: het is niet waar. Ten eerste is de ruimtetijd natuurlijk geen ‘doek’ die ergens opgehangen kan worden. Bovendien zit er een zekere cirkelredenering in dit verhaal: de kromming van het doek wordt veroorzaakt (volgens Newton) door de zwaartekracht die de voetbal naar beneden trekt, en kan dus geen verklaring voor diezelfde zwaartekracht bieden.

Deze tekortkomingen zou je echter met enige goede wil nog aan de kant kunnen schuiven. Een groter bezwaar is echter dat dit verhaal ook nog eens van geen kant klopt met wat de vergelijkingen van Einsteins theorie voorspellen. Zoals we eerder al noemden, worden ruimte en tijd in de relativiteitstheorie [samengevoegd tot één object](#), genaamd ruimtetijd. Afstanden in tijd (oftewel: tijdsverschillen) worden echter in andere eenheden gemeten dan afstanden in de ruimte. Om het toch mogelijk te maken om zulke afstanden samen te nemen, maakt de relativiteitstheorie gebruik van de lichtsnelheid. Dit is een enorm grote snelheid, ongeveer driehonderdduizend kilometer per seconde. Vermenigvuldig de ‘tijdsafstand’ in seconden met deze factor, en je krijgt een ‘afstand’ in kilometers. Als een appel gedurende ongeveer één seconde ongeveer één meter valt, is de ‘afstand’ die deze in de tijd aflegt dus vele malen groter dan de afstand die in de ruimte wordt afgelegd.

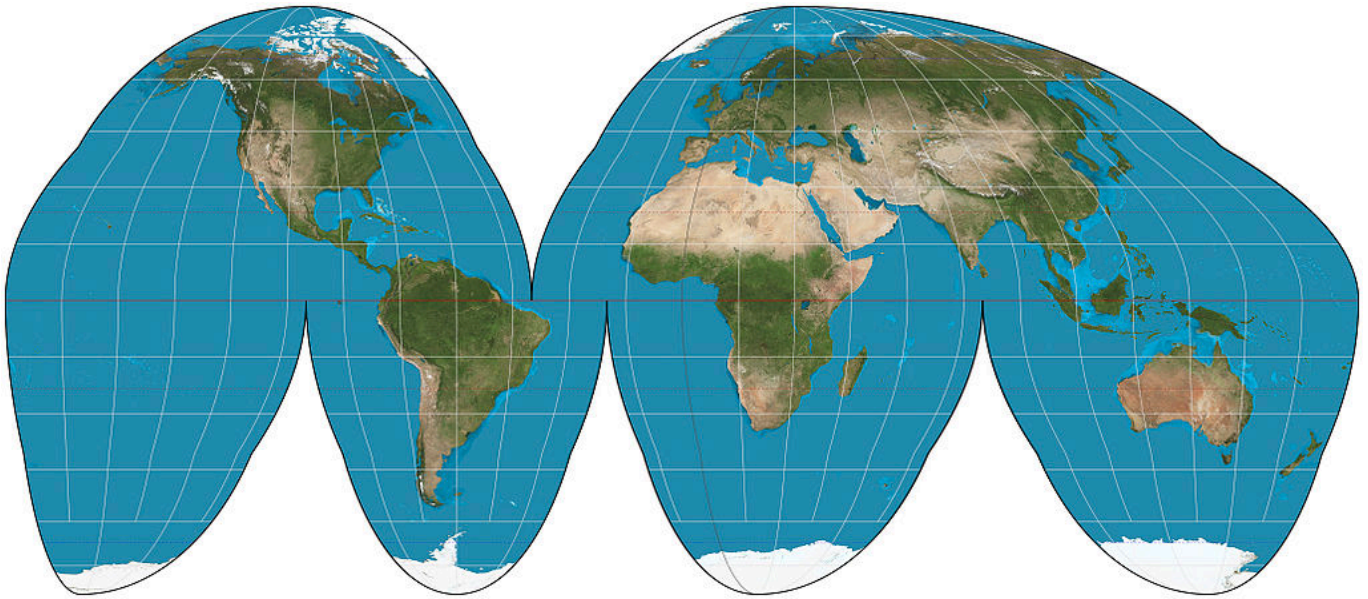
Zo lang ze allebei in dezelfde eenheid gemeten worden, voorspelt Einsteins theorie dat een grote massa, zoals de aarde, de ruimte en de tijd aan zijn oppervlak ongeveer evenveel beïnvloedt. Of liever gezegd, even weinig, want het effect op afstanden in de ruimte is zelfs

voor een zware planeet als de aarde erg klein. Doordat een vallende appel echter al snel een enorme 'afstand' in de tijd aflegt, is het effect van de kromming daarop nog duidelijk merkbaar. Sterker nog, in de relativiteitstheorie is dit uiteindelijk wat de appel ertoe beweegt om op de grond te vallen.



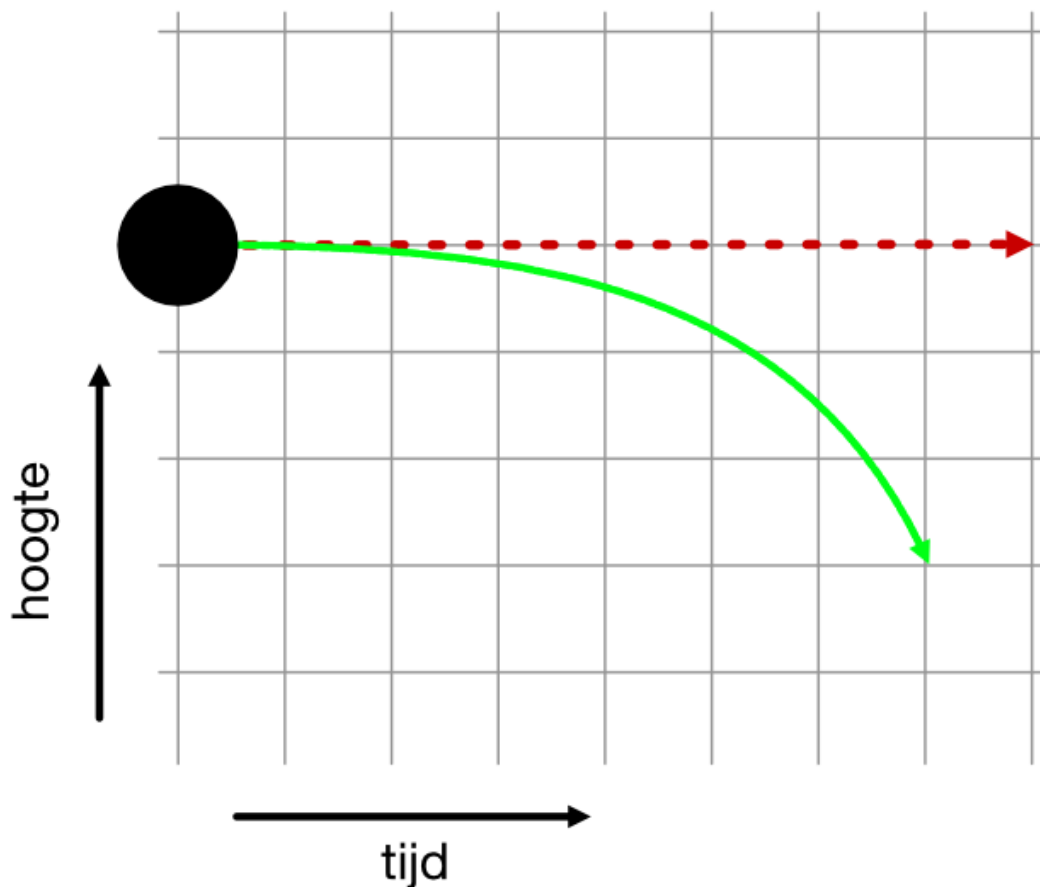
Afbeelding 3. Een rechte baan? Als je op de vlakke kaart zou afgaan lijkt het rode traject een rechte baan. Op de kromme aarde is de groene baan echter het rechtst! Gebaseerd op een kaartprojectie van [Strebe](#).

Om deze verklaring wat inzichtelijker te maken, kunnen we een nieuw verhaal ten tonele brengen. Stel je voor dat je in een vliegtuig van Amsterdam naar Vancouver zou willen vliegen. Afgaande op de bovenstaande kaart zou je kunnen denken dat je vanzelf op je bestemming aankomt zolang je in westelijke richting vertrekt en alsmaar rechtdoor blijft vliegen. In werkelijkheid zou deze strategie je echter flink uit koers brengen: je zou niet in Vancouver maar eerder in de buurt van Mexico eindigen! Dit komt doordat afstanden op de bovenstaande kaart misleidend zijn. Hoe dichter je bij de Noordpool of de Zuidpool komt, hoe groter de horizontale afstand tussen twee verticale lijnen in werkelijkheid wordt. De reden hierachter is bekend bij iedereen die wel eens een mandarijn gepeld heeft: je kunt de 'schil' van een bolvormig oppervlak, zoals de aarde of een mandarijn, niet zonder scheuren neerleggen op een plat oppervlak, zoals een kaart of een tafel.



Afbeelding 4. De aarde als mandarijnenschil. Als je de kaart op deze manier tekent komen de afstanden veel meer overeen met de daadwerkelijke afstanden op de aardbol. Kaartprojectie door [Strebe](#).

Als je het aardoppervlak zoals een mandarijnenschil plat op tafel zou proberen te leggen, kom je op iets als de bovenstaande kaart uit. Dat is natuurlijk weinig praktisch voor de navigatie in een vliegtuig, aangezien het moeilijk te zien is hoe de verschillende delen van de kaart op elkaar aansluiten. Om die reden gebruiken we in plaats daarvan kaarten zoals in afbeelding 3, waarbij we op de koop toenemen dat verticale afstanden op de kaart niet overeenkomen met de werkelijkheid.



Afbeelding 5. Een vallende bal. De bal beweegt een groot stuk in de tijdrichting, en door de kromming van de ruimtetijd ook een klein stukje in de ruimterichting.

Op eenzelfde manier kunnen we de val van een appel begrijpen door de afstand tot de grond en de afstand in de tijd die hij aflegt in één diagram te tekenen. Zonder de aarde zou de appel simpelweg 'rechtdoor' in dit diagram bewegen. Door de massa van de aarde worden afstanden in de tijdsrichting echter steeds korter naarmate je dichterbij het aardoppervlak komt. Hierdoor is 'rechtdoor' voor de appel nu niet langer wat het lijkt: net als bij het vliegtuig wordt het traject afgebogen! Volgens Einstein valt een appel dus altijd 'rechtdoor' in de ruimtetijd, maar is dit op aarde niet langer wat het lijkt!

Tijdens een ontspannen wandeling door een appelboomgaard zal het effect van deze afbuiging niet te onderscheiden zijn van het effect van de zwaartekracht van Newton. Als gevolg van Einsteins theorie is de wetenschappelijke interpretatie van een vallende appel echter radicaal veranderd. Door over zwaartekracht na te denken als de kromming van

ruimtetijd kun je op heel nieuwe fenomenen stuiten, zoals [zwarte gaten](#) en [zwaartekrachtsgolven](#), waar bij Newton geen sprake van was. Zoals je in de vele andere artikelen op deze website kunt zien zijn hier nog heel veel goede verhalen over te vertellen. Net als de bult op Newtons hoofd kan echter het verhaal over de doek en de voetbal naar het rijk der fabelen verbannen worden!

Bronnen

Dit artikel is geïnspireerd door de volgende twee bronnen:

- “*Why did the apple fall? A new model to explain Einstein’s gravity*”, Warren Stannard et al 2017 *Eur. J. Phys.* 38 015603, <https://doi.org/10.1119/1.4939927>
- “*Why does a ball fall?: A new visualization for Einstein’s model of gravity*”, Roy R. Gould, *American Journal of Physics* 84, 396 (2016), <https://doi.org/10.1088/0143-0807/38/1/015603>