

Zijn natuurconstanten constant?

De lichtsnelheid, de massa van een elektron, de constante van Planck: wie zich bezighoudt met natuurkunde komt regelmatig dit soort 'natuurconstanten' tegen. Waar komen ze vandaan? En zijn ze écht constant of kan hun waarde in in de loop van de tijd veranderen?

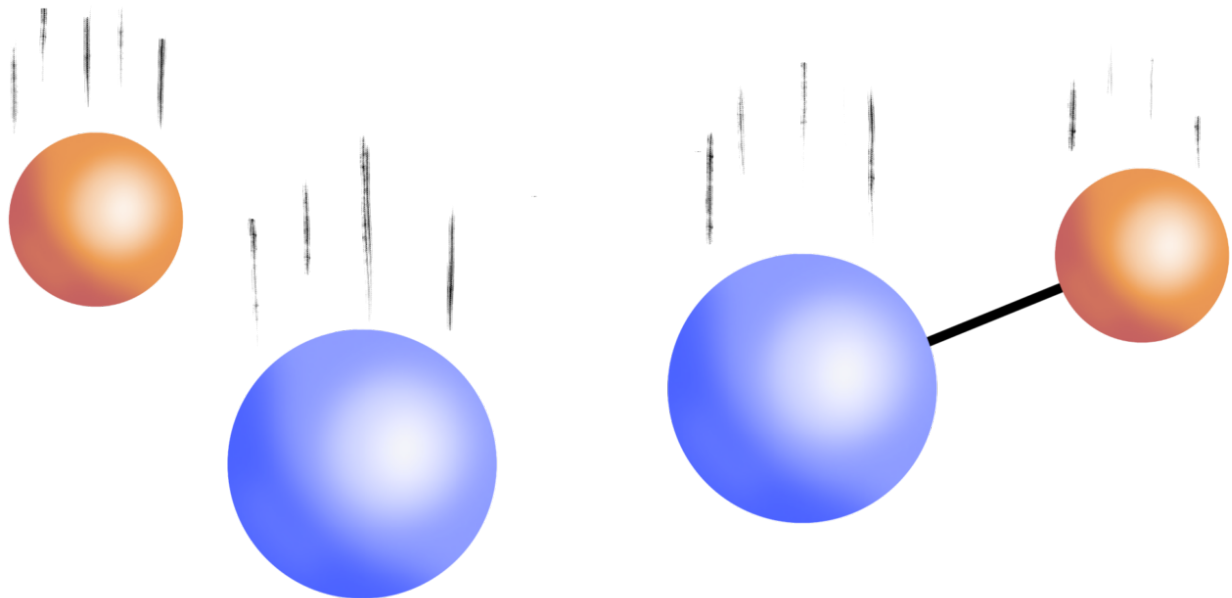


De Mètre Étalon. Ooit was dit precies hoe lang een meter was. De waardes van veel natuurconstanten hangen af van hoe we eenheden zoals de meter definiëren – maar als we eenmaal een vaste definitie hebben, zijn de natuurconstanten dan ook echt constant? Foto via [Wikimedia Commons](#).

Constanten van zwaartekracht

Aan het einde van de zestiende eeuw kwam Galileo Galilei tot de conclusie dat alle voorwerpen op aarde met dezelfde versnelling naar beneden vallen, ongeacht de massa van die voorwerpen. Hij beredeneerde dit aan de hand van een gedachte-experiment: stel dat we twee ballen met verschillende massa's van een toren naar beneden laten vallen. Volgens de

in die tijd geldende opvattingen zou de zware bal eerder beneden moeten zijn dan de lichte bal. Maar, zo beredeneerde Galilei, wat gebeurt er nu als we de twee ballen aan elkaar vast knopen, en het geheel in een keer naar beneden laten vallen? Als de lichte bal inderdaad langzamer valt, dan zal dit de zware bal afremmen, en zal het geheel dus langzamer naar beneden vallen dan de zware bal alleen. Maar de twee ballen samen zijn zwaarder dan de zware bal alleen, en het geheel zou volgens het geldende beeld dus ook sneller naar beneden vallen dan de zware bal alleen. Deze tegenspraak kan worden opgelost door aan te nemen dat de twee ballen én de samengebonden ballen allemaal even snel vallen. Galilei concludeerde hieruit dat alle voorwerpen op aarde dezelfde valversnelling ondervinden, een idee dat samengevat is in de bekende vergelijking $F = mg$. Hierin is g de valversnelling, zo'n $9,8 \text{ m/s}^2$, die in die tijd als constant en universeel werd beschouwd.



Het gedachte-experiment van Galileo. Als een zware bal sneller naar beneden valt dan een lichte bal, vallen ze samen dan sneller of minder snel naar beneden dan de zware bal alleen? Afbeelding: Sarah Jansen.

Zo'n honderd jaar later publiceerde Isaac Newton zijn theorie van zwaartekracht, waarin hij beargumenteerde dat vallende voorwerpen op aarde door dezelfde vergelijkingen worden beschreven als hemellichamen die in hun banen bewegen. Dit werd later samengevat in de formule $F = GmM/r^2$, met m en M de massa's van de twee voorwerpen die elkaar aantrekken, r de afstand tussen de zwaartepunten van die voorwerpen, en G de gravitatieconstante van

Newton. De gravitatieconstante van Newton wordt tegenwoordig door veel natuurkundigen beschouwd als een *fundamentele natuurconstante*, waarmee bedoeld wordt dat men gelooft dat hij constant is (dus onafhankelijk van de tijd en plaats), en dat hij slechts door metingen, en niet door de theorie, kan worden bepaald. Je kunt je afvragen of zulke natuurconstanten écht fundamentele constanten van ons universum zijn, en of we de grootte ervan dus nooit theoretisch kunnen bepalen, of dat onze theorie simpelweg nog niet compleet is. Vóór de komst van Newtons gravitatie-theorie had g bijvoorbeeld beschouwd kunnen worden als natuurconstante, maar uit Newtons theorie volgt dat g berekend kan worden als $g =$

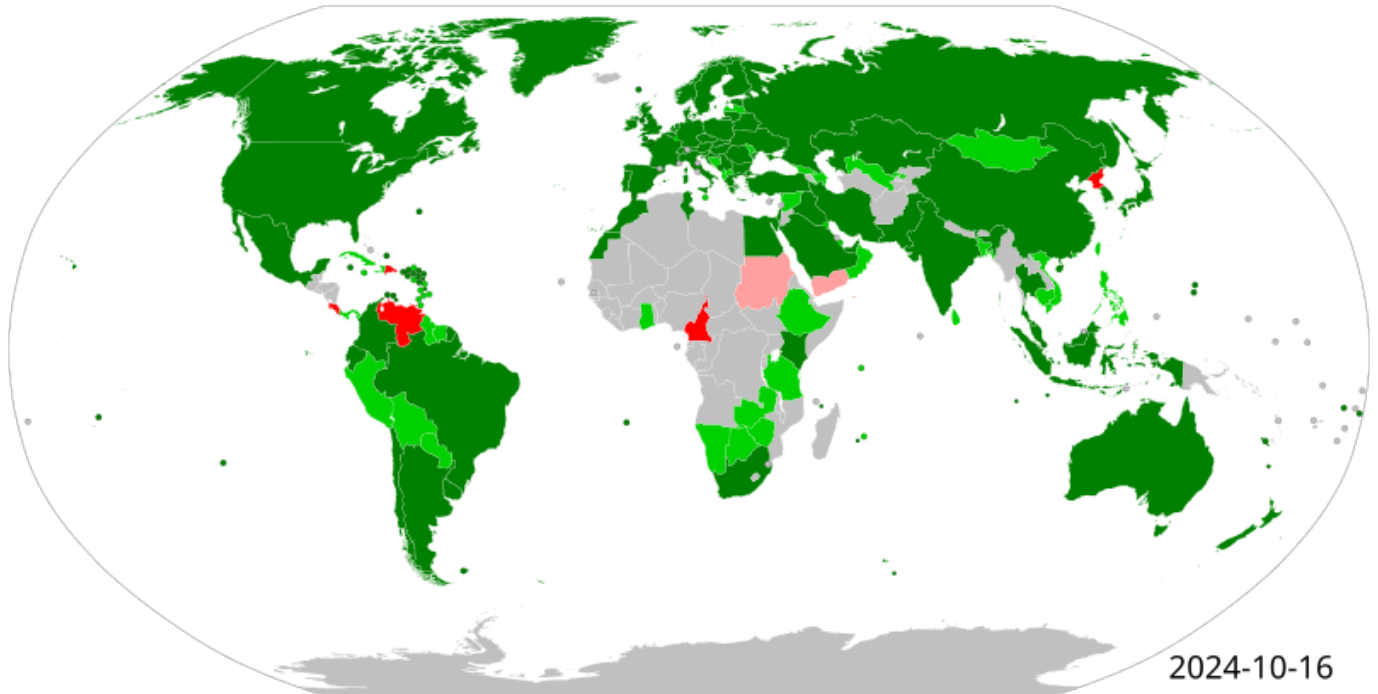
GM_{aarde}/r_{aarde}^2 . In het bijzonder weten we nu ook dat g niet exact constant is, maar afhangt van je locatie op aarde: op de polen is de aarde afgeplat en is de straal dus iets kleiner, waardoor de valversnelling daar iets groter is.

Universele eenheden

Toen Newton zijn theorie van zwaartekracht publiceerde, lag de nadruk op de brede toepasbaarheid van de theorie, en niet op de constante G . In die tijd was er nog geen universeel systeem van meeteenheden, en al zeker geen idee van fundamentele natuurconstanten. De eerste stappen in de richting van een universeel metrisch systeem werden kort na de Franse Revolutie gezet, toen de Franse Academie der Wetenschappen standardeenheden voor lengte en massa vastlegde. De eenheid van lengte werd de meter, gedefinieerd als één tien miljoenste deel van de afstand tussen de noordpool en de evenaar, gemeten over de meridiaan die door het Observatorium van Parijs loopt. De eenheid van massa werd de gram, de massa van een kubieke centimeter water bij 0 graden Celsius. Enkele decennia later werd hieraan ook de seconde, gebaseerd op de duur van een etmaal, toegevoegd als standardeenheid van tijd.

In 1875 werd de eerste [Meterconventie](#) getekend in Parijs, en werd een organisatie opgericht die verantwoordelijk is voor de eenheden. In 1960 creëerde deze organisatie het *Système international d'unités* (SI), een systeem van standardeenheden gebaseerd op de basiseenheden kilogram, seconde, meter, ampère, kelvin en candela¹. De mol als eenheid van chemische hoeveelheid werd hier enkele jaren later nog aan toegevoegd. Sindsdien is dit systeem van eenheden in de meeste landen de standaard geworden, en zijn alleen [de definities van sommige eenheden in de loop van de jaren nog aangepast](#) (zie ook de [lezing](#)

[van Klaasjan van Druten](#) tijdens Viva Fysica 2020). Vanuit de zeven SI-basiseenheden kunnen ontelbare andere eenheden worden afgeleid: denk aan de newton, de eenheid van de kracht, die gelijk is aan kilogram maal meter per seconde in het kwadraat.



De Meterconventie. Landen die de Meterconventie ondertekend hebben per 16 oktober 2024 (groen). 'Associate' landen (lichtgroen) zijn geen officieel lid van de organisatie, maar nemen wel deel aan bepaalde activiteiten. De landen in (licht-)rood waren (associate) lid, maar zijn dat nu niet meer. Afbeelding via [Wikimedia Commons](#).

In een systeem van eenheden zoals het SI-stelsel treden constanten op natuurlijke wijze op als omrekeningsfactoren, waarmee de verschillende eenheden in elkaar te vertalen zijn. Zo geeft de lichtsnelheid, uitgedrukt in meter per seconde, een manier om een tijd in secondes te vertalen naar een afstand in meters. Met de invoering van standaardeenheden raakte dus ook het idee van 'natuurconstanten' steeds meer ingeburgerd in de natuurkunde. Toen Max Planck in 1900 zijn [stralingswet](#) afleidde, was hij zich er bijvoorbeeld al van bewust dat hij daarin een nieuwe natuurconstante introduceerde – de constante die een belangrijke rol speelt in de quantummechanica en die we nu kennen als de constante van Planck.

Het probleem met eenheden

Zoals eerder genoemd, bedoelen we met *fundamentele* natuurconstanten dat die constanten slechts door metingen, en niet door de theorie, worden bepaald. De veronderstelde

constantheid van deze grootheden is daarmee een experimenteel resultaat, dat door metingen bevestigd of ontkracht kan worden. Wie dit wil onderzoeken, loopt echter tegen belangrijke problemen aan. Allereerst zijn de potentiële veranderingen van natuurconstanten natuurlijk ontzettend klein – anders waren ze nooit tot ‘constanten’ gekroond. Nog veel problematischer is dat een meting altijd gebaseerd is op een vergelijking van te meten hoeveelheid met de eenheid waarin je meet, en daarmee dus afhankelijk is van de gekozen eenheid. In het bijzonder kunnen eenheden zó gekozen worden dat bepaalde ‘natuurconstanten’ per definitie constant zijn. In de theoretische natuurkunde wordt bijvoorbeeld vaak gebruik gemaakt van [Planckeenheden](#), die gedefinieerd zijn door te eisen dat de lichtsnelheid, de zwaartekrachtsconstante, de gereduceerde constante van Planck ($\hbar$) én de Boltzmannconstante de waarde 1 hebben. Uit deze eis kunnen standaardeenheden voor bijvoorbeeld massa en lengte, de *Planckmassa* en *Plancklengte*, worden afgeleid.



De meter en de kilogram. Een kopie van de Mètre Étalon (links) en het International Prototype of the Kilogram (rechts). Tot respectievelijk 1983 en 2019 waren deze objecten te standaardmaatstaf voor de SI-eenheden ‘meter’ en ‘kilogram’. Afbeeldingen via Wikimedia Commons ([links](#), [rechts](#)).

Dit lijkt misschien een gekke manier om eenheden te definiëren, maar ook in het vertrouwde SI-stelsel is deze filosofie inmiddels doorgevoerd. Al in 1983 werd een exacte waarde aan de lichtsnelheid toegekend, die sindsdien gebruikt wordt om de meter te definiëren op basis van de seconde. Het gevolg hiervan is dat het niet langer betekenisvol is om de snelheid van het licht te meten in SI-eenheden. Op vergelijkbare wijze heeft de constante van Planck sinds

2019 een exacte waarde in het SI-stelsel, en wordt daarmee de kilogram gedefinieerd op basis van de andere eenheden. Waar in het verleden SI-eenheden aan de hand van door mensen gemaakte objecten, zoals de *Mètre Étalon* en het *International Prototype of the Kilogram* (IPK), werden gedefinieerd, kwam daar in 2019 dus definitief een einde aan. Alle zeven basiseenheden zijn nu gedefinieerd in termen van natuurconstanten.

Eenheidsloze natuurconstanten

Er zijn echter ook constanten die geen eenheid hebben. Het bekendste voorbeeld van zo'n eenheidsloze natuurconstante is de [fijnstructuurconstante](#), die aangeeft hoe sterk de elektromagnetische wisselwerking tussen twee elementaire deeltjes zoals elektronen is. De waarde van de fijnstructuurconstante – ongeveer $1/137$ – hangt niet af van de eenheden die we gebruiken. Voor deze waarde is (nog) geen theoretische verklaring; de waarde is bepaald aan de hand van metingen.

De meeste natuurkundigen beschouwen alleen zulke eenheidsloze natuurconstanten als de échte fundamentele constanten, omdat deze volledig onafhankelijk zijn van de menselijke keuzes van eenheden, en ons dus echt iets vertellen over het universum, niet alleen over hoe we ervoor kiezen om dat universum te meten. Je zou je kunnen afvragen wat er gebeurd zou zijn als deze eenheidsloze constanten een heel andere waarde hadden gehad. Zouden wij mensen dan wel hebben bestaan? Zou de aarde eigenlijk wel bestaan? En de zon? Als het antwoord op die vragen “nee” zou zijn, lijkt het eigenlijk heel toevallig dat de waardes van de natuurconstanten precies zo zijn dat er leven mogelijk is. Sommigen verklaren dit ‘toeval’ met het [antropisch principe](#): het feit dat wij bestaan, betekent automatisch dat we in een heelal leven met die waardes van de natuurconstanten.

Lang niet alle natuurkundigen nemen genoeg met deze filosofie, en velen streven er dan ook naar om het aantal eenheidsloze fundamentele natuurconstanten in de theorie te verminderen. Op dit moment zijn er 26 fundamentele eenheidsloze constanten: de [kosmologische constante](#), de fijnstructuurconstante, de koppelingsconstante van de sterke kernkracht, vijftien massa's van [elementaire deeltjes](#) (gedeeld door de Planckmassa) en acht parameters die de toestanden van quarks en neutrino's beschrijven. Het is de hoop van veel natuurkundigen dat dit aantal van ogenschijnlijk willekeurige constanten naar beneden kan worden gebracht, idealiter naar nul.

[1] De candela is de eenheid van lichtsterkte.

QU is sinds kort weer actief op Instagram! Volg ons voor nieuws en aankondigingen van nieuwe artikelen: <https://www.instagram.com/quantumuniverse.nl/>