

Zijn Natuurconstanten Constant ?

Wim Ubachs

Afdeling Natuurkunde en Sterrenkunde, Vrije Universiteit

Inleiding: Natuurconstanten en fijnafstemming

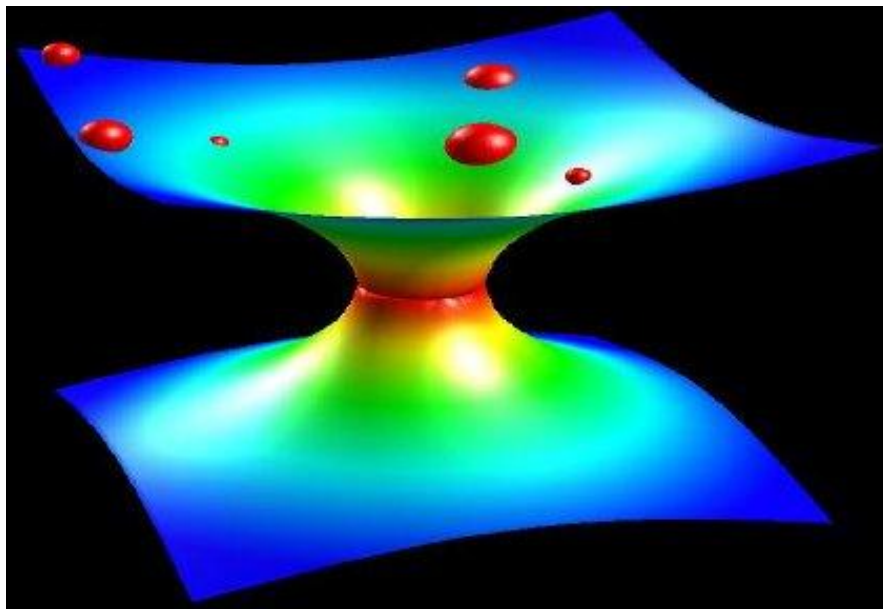
Sinds de tijden van Galileo streven natuurkundigen ernaar de wetten van de natuur in wiskundige formules te gieten. De natuurconstanten bepalen daarbij “de maat der dingen”, want ze geven de verhoudingen weer tussen belangrijke fysische grootheden. Er is altijd voetstoots aangenomen, dat deze “constanten” en daarmee ook de wetten eeuwigheids-waarde hebben. Zo stelde Galilei zelf een wet op voor vallende lichamen op, $F=mg$, waarbij g de constante van de valversnelling representeert, door hem als universeel beschouwd. Newton toonde later aan dat de versnelling van vallende lichamen op aarde, zowel als de beweging van hemellichamen in hun banen aan het firmament, worden beschreven met de meer algemene gravitatiewet, $F=GmM/r^2$, die ook een uitdrukking geeft voor de valversnelling, $g=GM/r^2$, met M de massa van de aarde, r de straal van de aarde, en G de universele gravitatieconstante, die we nu als een fundamentele natuurconstante beschouwen. Dit leert dat planeten als het ware een “valbeweging” rond de zon ondergaan, en tegelijkertijd dat vallende appels op een bergtop, of boven het oppervlak van de maan, langzamer vallen. Volgens de nieuwste inzichten is de waarde van deze natuurconstante: $G=6.6738(8) \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}$. Het getal tussen haakjes geeft de meetfout in de bepaling van G aan.

De structuur van de materie om ons heen wordt beschreven door twee natuurconstanten, de “fijnstructuurconstante” α die de sterkte van de elektromagnetische wisselwerking bepaalt, en de massaverhouding μ van protonen en elektronen: $\mu=M_p/m_e$. De waarde van α wordt meestal gegeven als de inverse fijnstructuurconstante $1/\alpha=137.03599907(4)$, terwijl de waarde van de massaverhouding $\mu=1836.1526724(7)$ bedraagt. Merk op dat α en μ dimensieloze grootheden zijn, dus getallen die de structuur van de materie in ons Universum bepalen. Ze bepalen de bindingsenergie van elektronen in atomen, de sterkte van chemische bindingen in stoffen, en de onderlinge trillingsfrequenties van atomen in moleculen. De natuurkunde heeft vooralsnog geen verklaring waarom deze natuurconstanten deze waarden hebben, net zo min als voor de koppelingsconstanten van de zwakke wisselwerking (G_F), de sterkte van gravitatie (G), en de zogenaamde kosmologische constante (Λ) die de uitdijing van het heelal regelt. Veel fysici hebben zich het hoofd gebroken over het waarom achter de waarden van de fundamentele natuurconstanten. Een Duitse fysicus schreef een kort artikel waarin hij meldde dat de waarde van μ zou overeenkomen met $6\pi^5$, en dat was inderdaad het geval bij de toenmalig, in de vijftiger jaren, bekende waarde van de massaverhouding, $\mu=1836.12(5)$. Wolfgang Pauli verdiepte zich in het probleem, zonder veel succes, en stierf uiteindelijk in kamer 137 van het hospitaal te Zürich.

De fundamentele natuurconstanten lijken betrokken te zijn in een samenzwering die bekend is als “fijn-afstemming” (fine-tuning). De waarden, die de natuurconstanten in ons Universum aannemen, bepalen dat protonen stabiel zijn, dat er een verzameling van 100 elementen bestaat, dat melkwegstelsels kunnen vormen, dat sterren over lange periodes kunnen branden, dat ongeveer gelijke hoeveelheden van het element koolstof en zuurstof

worden geproduceerd in super-nova explosies, en dat complexe chemie op basis van koolstof kan plaatsvinden. Minieme afwijkingen in de waarden van α , μ of Λ zouden een saai Universum opleveren, waar weinig gebeurt. Mogelijk bestaan deze specifieke waarden van de natuurconstanten alleen in een lokaal, fijn afgestemd deel van het Universum, het deel van het Universum waar wij wonen.

De vraag naar het waarom van de waarden van de natuurconstanten wordt door velen beschouwd als het diepste mysterie betreffende ons Universum. De theoretische natuurkunde heeft nog geen antwoord kunnen leveren, en waarschijnlijk zal zij dat ook nooit doen. De speciale samenloop is wel verklaard met het Anthropisch Principe [Barrow & Tipler 1986]: de notie dat ons Universum speciaal is omdat intelligente levensvormen, die dit Universum heeft voortgebracht, het kunnen bestuderen. Deze verklaring wordt echter door velen terzijde geschoven, omdat ze circulair is en niet-wetenschappelijk, want religieus. Anthropische scenarios zijn inderdaad metafysisch en missen de mechanistische verklaringsgrond kenmerkend voor fysische theorieën. Een *mechanistisch* kosmologisch scenario is voorgesteld, waarin via een proces van evolutie en natuurlijke selectie sequenties van multiversa worden geformeerd [Smolin 1997]. Opeenvolgende generaties universa ontstaan via voortplanting in een zwart gat ("bouncing black hole singularity"). Dit leidt uiteindelijk tot een Universum waarin complexiteit ontstaat, echter niet als doel maar als bijproduct vanwege de evoluerende condities die een Universum met 10^{17} zwarte gaten geproduceerd hebben. In een dergelijk scenario zouden minieme *variaties* in de fundamentele natuurconstanten (te interpreteren als mutaties) cruciale ingrediënten kunnen zijn. Een van de motivaties om te zoeken naar minimaal driftende natuurconstanten in een vroege stadium van ons Universum is gerelateerd aan genoemd mysterie.



Figuur 1: Representatie van een "bouncing black hole singularity". Aan de bovenkant een materie-invangend zwart gat. De natuurkunde heeft (nog) geen concrete theorie over de processen die plaatsvinden in het singuliere punt; het ontstaan van een Universum met andere waarden van de natuurconstanten is een hypothese.

Experimentele kijk op variërende constanten

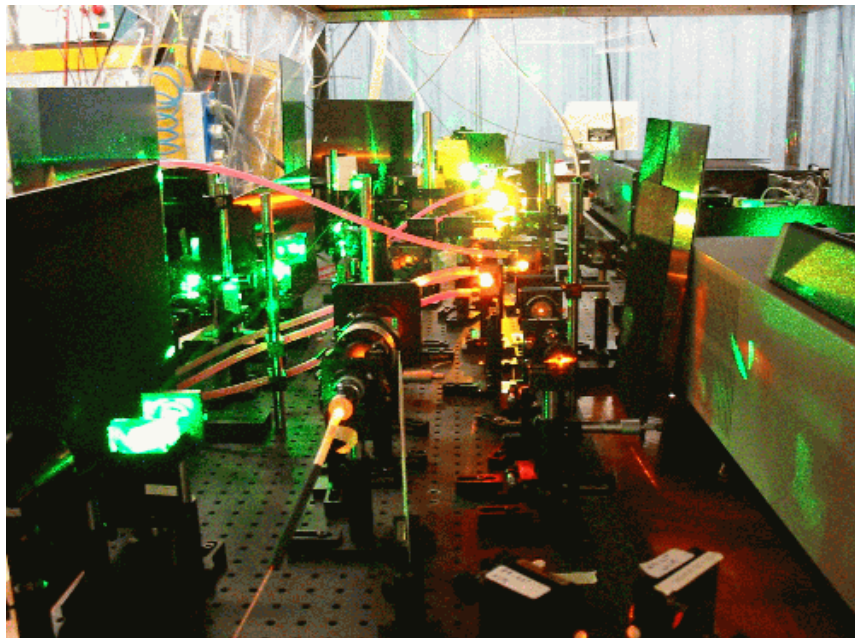
De mogelijkheid dat fundamentele natuurconstanten in de tijd variëren, of dat ze verschillende waarden aannemen in onderscheiden delen van het (multi)-Universum, is een thema geworden van *experimentele wetenschap*. Fysici begrijpen nu in de fijnste details hoe de quantum-niveau structuur van atomen en moleculen afhangt van de twee relevante parameters die het spectrum bepalen, de fijnstructuurconstante α en de proton-electron massaverhouding μ . Ze kunnen uitrekenen hoe een kleine verandering in deze waarden, $\Delta\alpha$ en $\Delta\mu$, de precieze golflengtes (of frequenties) van de spectraallijnen verschuift [Ubachs 2007]. Het verschuivingseffect wordt uitgedrukt met $\Delta f/f = K_\mu \Delta\mu/\mu$ voor een verandering in μ ; $\Delta f/f$ geeft dan de relatieve verschuiving van een spectraallijn. De evenredigheidsconstante K_μ kan worden uitgerekend met quantummechanische methoden; van belang is dat de waarde van K_μ verschillend is voor de diverse spectraallijnen van een molecuul. Zo kan worden bestudeerd of de quantumstructuur van moleculen, zoals die in het laboratorium wordt gemeten, overeenkomt met die van moleculen waargenomen in het vroege Universum. Natuurlijk moet worden meegenomen dat het Universum in de loop van de tijd is uitgedijd. Deze oprekking van de metriek veroorzaakt een roodverschuiving van alle spectraallijnen; de roodverschuiving leert dan ook hoe ver weg, of hoe oud, het absorberende melkwegstelsel is. De spectra van moleculen zijn vooral afhankelijk van de proton-electron massaverhouding μ , waar we ons toe zullen beperken. Een bijkomend fenomeen is, dat onder aanname van Grote Unificatie van krachten, mogelijke variaties van α en μ verbonden zijn, en dat μ sneller zou moeten veranderen dan α , als er al iets verandert. Dat maakt dat moleculen een goede testbasis vormen om te zoeken naar een verandering van een natuurconstante.



Figuur 2: Afbeelding van de vier grote telescopen (Very Large Telescopes – VLTs) van de Europese Zuidelijke Sterrenwacht (ESO) in Paranal, Chili. De schotels hebben een diameter van 8.2 meter. De UVES spectrometer, die gebruikt wordt om spectra van moleculair waterstof in het vroege Universum waar te nemen, is onderdeel van de tweede telescoop (van links), ofwel Kueyen in de Mapuche taal van de vroegere bewoners van Chili.

Laboratorium waarnemingen en vergelijkingen

Moleculair waterstof (H_2) is het meest voorkomende molecuul in het Universum, en het kan worden waargenomen in de verst verwijderde gaswolken op een afstand van ruim 10 miljard lichtjaren. Om een nauwkeurige vergelijking te faciliteren moeten ook de absorptie-golflengtes in de huidige epoche met grote precisie worden gemeten. Dergelijke metingen zijn verricht met de extreem-ultraviolette (XUV) laser, gebouwd in het LaserLaB van de Vrije Universiteit. In het laboratorium worden de spectrale absorptielijnen van het H_2 -molecuul bij golflengtes van 90-115 nm gemeten. De onderzoekers beschouwen de bouw van deze XUV-laser, en de daarmee verrichte metingen als een belangrijk wetenschappelijk resultaat; bedenk daarbij dat er geen transparante materialen bestaan voor XUV-straling (dus geen vensters of lenzen) en dat zelfs lucht deze vorm van licht niet doorlaat [Eikema & Ubachs 2010]. De astronomische waarnemingen van dezelfde H_2 lijnen vinden plaats bij golflengtes tussen 300 en 400 nm, dus in het nabije ultraviolette en blauwe deel van het spectrum, waarvoor de aardse atmosfeer transparant is. Dat lijkt in tegenspraak, maar de golflengtes worden gedurende hun lange reis naar de aarde met meer dan een factor drie uitgerekt vanwege de uitdijning van het heelal. Dat komt dus goed uit; zonder roodverschuiving zouden de waterstoflijnen niet kunnen worden waargenomen.

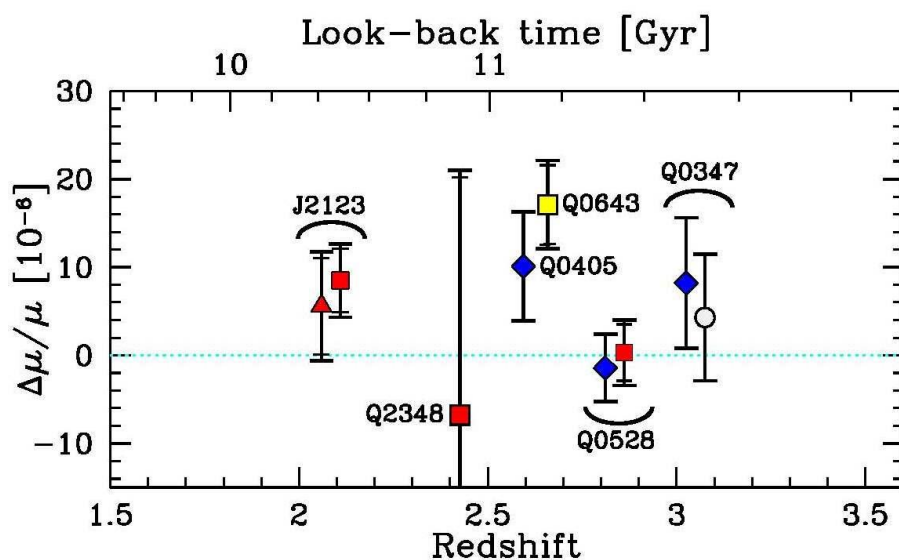


Figuur 3: Foto van de gepulste kleurstofversterker die deel uitmaakt van de Amsterdamse extreem ultraviolette laser, waarmee in golflengte afstembare straling wordt geproduceerd tussen 90 en 115 nm, gebruik makend van diverse optische technieken.

Een vergelijking tussen de golflengtes van spectraallijnen waargenomen met telescopen bij hoge roodverschuiving en dezelfde spectraallijnen gemeten in het laboratorium (dus bij roodverschuiving 0) kan gemaakt worden via de volgende formule:

$$\frac{\lambda_i^z}{\lambda_i^0} = (1 + z_{abs}) \left(1 + K_i \frac{\Delta\mu}{\mu} \right)$$

waar bovenindices “z” en “0” de roodverschuiving aangeven. Verder geeft “z_{abs}” de roodverschuiving van de absorberende gaswolk in het ver verwijderde melkwegstelsel weer. Uit een statistische analyse, waarin een honderdtal H₂-lijnen meegenomen worden, volgt dan een waarde voor de relatieve variatie van de natuurconstante μ , uitgedrukt als $\Delta\mu/\mu$. Slechts van een zestal waterstofwolken in het verre Universum zijn spectra van hoge kwaliteit (goede signaal/ruis verhouding, veel lijnen zichtbaar) waargenomen, en de resultaten van de statische analyses zijn in grafiek opgenomen in Figuur 4. Hoewel enkele individuele resultaten van quasarspectra een variatie van μ lijken te impliceren is het gemiddelde resultaat over de waarnemingen aan de zes objecten als volgt samen te vatten: de relatieve verandering van de dimensieloze proton-electron massaverhouding is minder dan 10^{-5} , ofwel 0.001%, voor terugbliktijden van 10,5-11,5 miljard jaar. Merk op dat de leeftijd van het heelal 13,8 miljard jaar bedraagt.

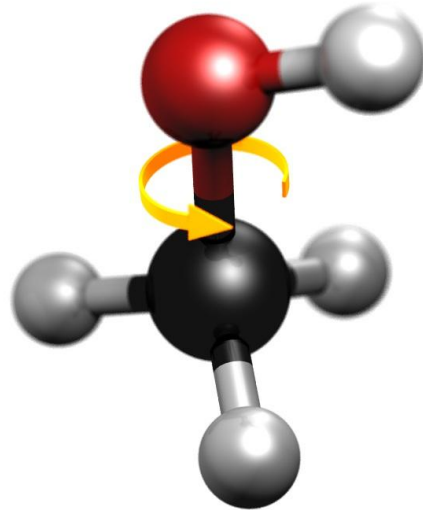


Figuur 4: Overzicht van de resultaten van quasarsystemen waarin H₂ moleculen bij hoge roodverschuiving zijn waargenomen. Zes van dergelijke absorberende melkwegstelsels zijn bestudeerd voor “terugblik”-tijden tussen 10,5 en 11,5 miljard jaar. Uit de gegevens kan de conclusie getrokken worden dat de proton-electron massaverhouding met minder dan 0.001% is veranderd. De indicaties J2123, Q2348 en dergelijke verwijzen naar specifieke quasars en hun coördinaten aan de hemel.

Gevoeliger moleculen: methanol

Met dit “nul”-resultaat, volgend uit de combinatie van astronomische waarnemingen en laboratoriummetingen aan H₂, doet zich de vraag voor hoe dit verbeterd kan worden. Dat kan door beter en vooral langer te meten (maar de telescooptijd op de VLT is beperkt), of door een gevoeliger meetmethode te kiezen. Uit molecuulfysische berekeningen volgt hoe de interne bewegingen van kernen in moleculen afhangen van μ . De wetten van de quantumfysika leren dat interne bewegingen in moleculen, waarbij “quantum-tunneling” optreedt, heel gevoelig zijn voor minieme variaties van massa. Op basis van dit principe heeft ons VU team berekend, dat een speciaal geval van interne rotatie in moleculen aanleiding geeft tot spectraallijnen die heel gevoelig zijn voor μ -variatie [Jansen 2011]. Daarbij is aangetoond dat het methanol molecuul (CH₃OH), ofwel de eenvoudigste vorm van alcohol, het meest gevoelige moleculaire

systeem is om een driftende μ te detecteren. Sommige spectraallijnen van methanol hebben een gevoeligheidscoëfficiënt K_μ die duizend keer groter is dan voor H_2 .



Figuur 5: Het methanolmolecuul (CH_3OH) met: grijze bollen: H-atomen; zwarte bol: C-atoom, rode bol: zuurstofatoom. De gele pijl geeft de interne rotatie van de OH groep ten opzichte van de CH_3 groep in het molecuul aan.

Radioastronomie

De gevoelige spectraallijnen van methanol, die te maken hebben met rotatie en torsiebewegingen in het molecuul, vallen in het frequentiegebied van radio- en microgolffrequenties, tussen 5 and 300 GHz. Dergelijke lijnen zouden in principe waargenomen kunnen worden met radiotelescopen. Tot voor kort waren er geen ver verwijderde extragalactische objecten bekend waarin methanolmoleculen geïdentificeerd waren. Echter, er is één absorberend melkwegstelsel bekend in de richting van de sterke radiobron PKS1830-211, op een afstand van 7,5 miljard lichtjaren. In dat stelsel zijn reeds vele moleculen waargenomen, waaronder HC_3N , HCO^+ , en ammonia (NH_3). In samenwerking met radioastronomen van het Max Planck Instituut voor Radioastronomie in Bonn, die de beschikking hebben over de 's werelds op-een-na grootste radiotelescoop, de Effelsberg radio telescoop met een schotel van 100 meter diameter, zijn we een zoektocht gestart om methanolmoleculen waar te nemen in dat bijzondere stelsel. In enkele waarnemingscampagnes in 2011 en 2012 zijn we er inderdaad in geslaagd om vier spectraallijnen van methanol te detecteren, waaronder twee lijnen met een grote gevoeligheid. De analyse van die spectra leidt tot een limitering van een variërende natuurconstante resulterend in $\Delta\mu/\mu < 10^{-7}$ voor een terugbliktijd van 7,5 miljard jaar, meer dan de helft van de levensduur van het heelal [Bagdonaite 2013]. Dat is een factor 100 meer limiterend dan de waterstofmetingen, die wel verder terug kijken naar de oorsprong van het universum.



Figuur 6: De radiotelescoop met de 100-meter schotel van het Max Planck Instituut voor Radioastronomie in Effelsberg, in de Duitse Eifel. Dit instrument is geschikt voor het meten van frequenties tussen 1 GHz en 80 GHz.

Op dit moment wordt een internationaal onderzoeksprogramma uitgevoerd, onder aanvoering van de Amsterdamse groep, waarbij 's werelds meest gevoelige radiotelescopen worden ingezet om methanolmoleculen waar te nemen in de gaswolk in de richting van PKS1830-211: naast de Duitse Effelsberg 100m telescoop de Extended-Very Large Array (E-VLA) in New Mexico, de IRAM telescoop op de Pico Veleta nabij Granada in Zuid-Spanje, en de Atacama Large Millimeter Array (ALMA) op de Chajnantor hoogvlakte op de Chileens-Boliviaanse grens. Zowel de IRAM als de ALMA telescoop staan op grote hoogte en hebben daar minder last van absorptie door waterdamp in de atmosfeer, waardoor hogere frequenties kunnen worden gemeten. Natuurlijk wordt ook gezocht naar methanol in verder verwijderde objecten. Mogelijk leiden die uitgebreidere observaties tot een verdere limitering op een variërende natuurconstante, beter dan het 10^{-7} niveau (ofwel 0.00001%). Of, als alternatief, die observaties tonen onomstotelijk aan dat de proton-electron massaverhouding, een dimensieloze natuurconstante, echt verandert gedurende de ontwikkelingsgeschiedenis van het Universum. Een dergelijke vondst zou onze kijk op het Universum diepgaand veranderen.

Literatuur en Referenties

- J.D. Barrow & F.J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press (1986).
 L. Smolin, *The Life of the Cosmos*, Oxford University Press (1997).
 W. Ubachs et al., *On a possible variation of the proton-electron mass ratio; H_2 spectra in the line of sight of high-redshift quasars and in the laboratory*, Journal of Molecular Spectroscopy 241, 155 (2007).
 K.S.E. Eikema & W. Ubachs, *Precision Laser spectroscopy in the Extreme Ultraviolet*, Handbook of high resolution spectroscopy, John Wiley & Sons (2010).
 P. Jansen et al., *Methanol as a sensitive probe for spatial and temporal variations of the proton-to-electron mass ratio*, Physical Review Letters 106, 100801 (2011).
 J. Bagdonaite et al., *A stringent limit on a drifting proton-to-electron mass ratio from alcohol in the early Universe*, Science 339, 46 (2013).