

Natuurconstanten, varia

In ons beeld van de natuur en de natuurkunde zijn de fundamentele constanten, zoals h , c , m_e , en e altijd beschouwd als rotsvaste constante pijlers van het bouwwerk. Dirac was de eerste die deze veronderstelling betwistte, maar hij richtte zijn pijlen vooral op de gravitatieconstante G . Einstein vroeg zich daarentegen af of God een vrije keus had gehad bij het vastleggen van de onderlinge waarden van de natuurconstanten, en hij meende van niet. In de afgelopen zestig jaar hebben vele fysici zich over deze materie gebogen, leidend van verhelderende inzichten (onder andere Teller) tot obscure numerologische speculaties (Eddington). Recentelijk is de kwestie in het domein van de waarnemingen getild, waarbij spectra van quasars en ultrastabiele lasers een rol spelen.

Wim Ubachs en Elmar Reinhold

wimu@nat.vu.nl



elmar@nat.vu.nl



Wim Ubachs is gepromoveerd in Nijmegen en, na postdocs in Dalian (China) en Stanford, sinds 1988 verbonden aan de VU. Sinds 2001 is hij als deeltijdhoogleraar verbonden aan de TUE, en vanaf 2003 gewoon hoogleraar in de Atoom-, Molecuul- en Laserfysica aan de VU. Hij is tevens directeur van het Lasercentrum VU.

Elmar Reinhold is gepromoveerd aan de VU (2000) op een proefschrift handelend over aangeslagen toestanden in waterstof met grote inter-nucleaire afstand. Na een verblijf van enkele jaren aan het Laboratoire Aimé Cotton (Orsay, Frankrijk) als Marie Curie-fellow, is hij recentelijk weer teruggekeerd naar het La-

sercentrum VU. Hier houdt hij zich bezig met moleculfysische problemen gerelateerd aan atmosferische fysica en astrofysica.

Het is zeker nog te vroeg om van een experimenteel bewijs te spreken, maar de analyses van absorptiespectra van quasars door een internationaal team van wetenschappers [1] geven op zijn minst een indicatie dat er wel iets aan de hand is met de tijdsafhankelijke constante waarde van een van de natuurconstanten, namelijk de dimensionloze fijnstructuurconstante α ($\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$), die een maat vormt voor de sterkte van de elektromagnetische wisselwerking. Het onderliggende idee is dat het licht van quasars miljarden jaren geleden door nabijgelegen interstellaire wolken gereisd is, en daarvan een vingerafdruk heeft meegenomen in de vorm van een absorptiespectrum. Daaruit kunnen we afleiden hoe sterk de elektromagnetische krachten waren, zo'n tien miljard jaar geleden. De uitvoerige analyse van opsplitsingen tussen spectrale lijnen in fijnstructuurmultipletten van verschillende atomen en ionen, leidde uiteindelijk tot een afschatting van de tijds-

variatie van de fijnstructuurconstante $\Delta\alpha/\alpha = (-7,2 \pm 1,8) \times 10^{-6}$. In de analyse zijn data van allerlei opsplitsingen (Ni-II, Cr-II, Zn-II, en andere) meegenomen, in een zogenaamde 'many-multiplet-methode' voor een totaal van 128 quasars bij roodverschuivingen in de grootte van $0,5 < z < 3,5$, overeenkomend met terugkijktijden van drie tot elf miljard jaar. Ervan uitgaande dat de variatie lineair in de tijd verloopt geeft dit een veranderingstempo van $\Delta\alpha/\alpha = 5 \times 10^{-16}$ per jaar. Overigens zijn in de periode tussen het schrijven van dit stuk en het corrigeren van de drukproeven alweer een drietal publicaties verschenen, die de resultaten van [1] betwisten.

GEOFYSISCHE FENOMENEN

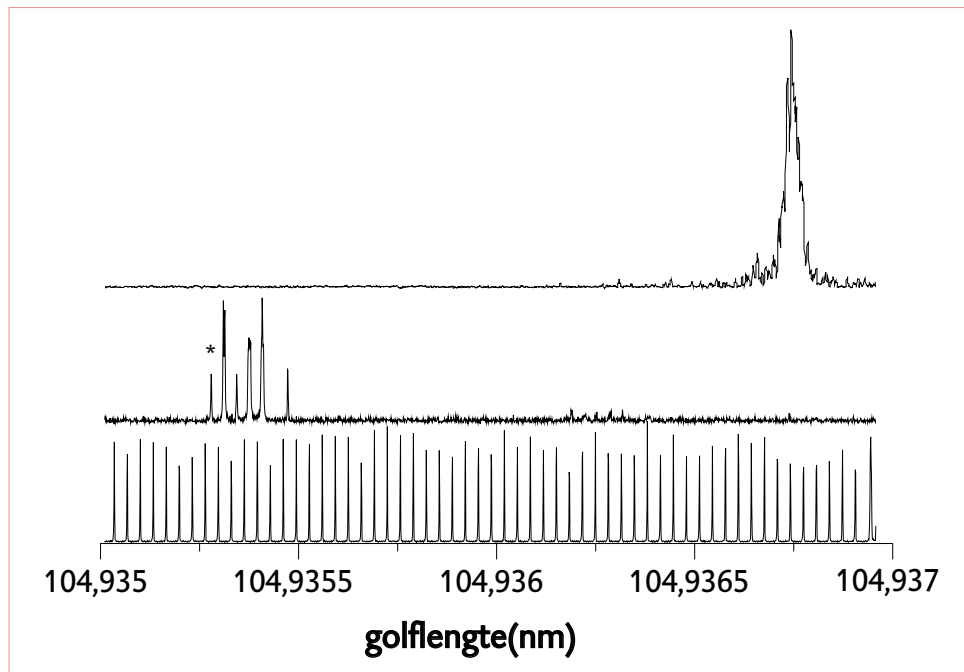
Naast deze astrofysische data spelen ook geofysische fenomenen een rol in de discussie. Eerder had Teller al aangetoond dat een aanname van Dirac over de verandering van G , de logische consequentie heeft dat in het tijdperk van het Cambrium de oceanen gekookt zouden hebben, wat in tegenspraak is met fossiele vondsten. Verder wordt uit metingen aan afwijkende $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ -isotopenverhoudingen, alsmede uit vondsten van een groot aantal splijttingsproducten in mijnen bij Oklo in Gabon, geconcludeerd dat er twee miljard jaar geleden een natuurlijke kernreactor ondergronds gewerkt heeft, waarin naar schatting 200 kg ^{235}U is opgebrand. Uit de verhouding van $^{149}\text{Sm}/^{150}\text{Sm}$ -splijttingsproducten en een analyse van mogelijke tijdsveranderingen in de doorsnede voor neutronenvangst (met een aantal veronderstellingen, ook over de sterke wisselwerking) werd een limitering voor α afgeleid: $\Delta\alpha/\alpha < 5 \times 10^{-17}$ per jaar. De ontwikkelingen in de laserfysica, met de revolutionaire uitvinding van fase-gestabiliseerde femtosecondelasers, waarvan de herhalingsfrequentie aangepast kan worden aan een radio-

bel of constant?

frequente standaard, hebben geleid tot zogenoemde *frequentiekammen* met een absolute stabiliteit van 10^{-14} – 10^{-15} . Deze lasers worden op dit moment in verschillende laboratoria aangewend om extreme precisiemetingen te verrichten aan een aantal spectrale overgangen in ultrakoude atomen, en aan enkelvoudige ionen ingevangen in ionenvallen. Een analyse, waarbij verschillende lijnen tegelijkertijd worden meegenomen van zowel optische overgangen alsook radiofrequente overgangen heeft onlangs al opgeleverd dat α minder dan 10^{-14} per jaar varieert in deze tijd. De ontwikkelingen in dit gebied gaan zo snel dat spoedig nauwkeuriger schattingen verwacht worden.

MASSAVARIATIES?

Als men op zoek is naar tijdsvariaties in de fundamentele natuurconstanten is het van belang om dimensieloze constanten te beschouwen (zie kader 'Dimensieloze constanten'). Daarom richt men zich op de fijnstructuurconstante α , op een aantal g -factoren, of op de verhouding van de protonmassa over de elektronmassa $\mu = M_p/m_e$. Het spectrum van moleculair waterstof, het meest voorkomende molecuul in het universum, kan aangewend worden voor detectie van een verandering van μ in de tijd. De prominente



Figuur 1

Registratie van een spectraallijn, de zogenoemde $R(0)$ -lijn, in de $(4,0)$ -Lyman-band van moleculair waterstof met de smalbandige extreem-ultraviolet laser in het lasercentrum vu. De golflengte van deze lijn is $\lambda = 104,936744 \pm 0,000004$ nm. De ijking is verricht met behulp van een étalon-transmissiespectrum (onder), en een jodium-calibratie-lijn (middelste spectrum).

absorptielijnen in de Lyman- en Werner-bandsystemen, overeenkomend met excitatie van een van de $1s$ -elektronen naar een $2p$ -orbitaal, die langs de moleculaire as georiënteerd kan zijn ($2p\sigma$), of loodrecht daarop ($2p\pi$), liggen in het domein van het extreme

ultraviolet tussen 90 en 100 nm. Deze banden kunnen niet vanaf de aarde worden waargenomen, omdat licht bij deze golflengten niet door de atmosfeer dringt. Maar de natuur helpt ons hier een handje: de lijnen in deze banden, geproduceerd door absorpties in

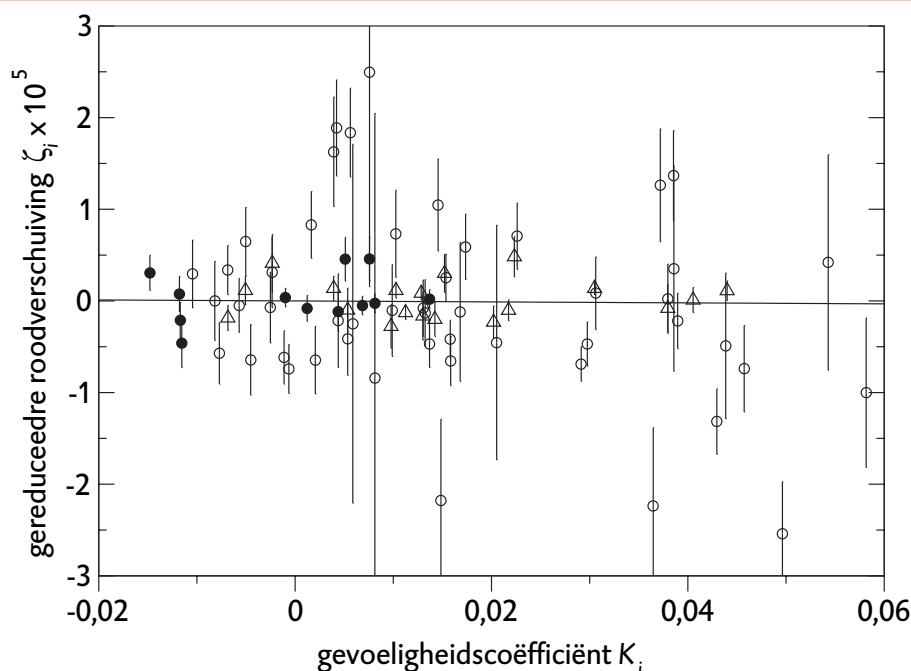
209

Dimensieloze constanten

Welke natuurkundige zou nog betwisten dat de (vacuüm)lichtsnelheid c een absolute constante is? De relativiteitstheorie van Einstein is hierop gebaseerd, en alle waarnemingen duiden erop dat de snelheid van een lichtflits op geen enkele manier afhangt van de snelheid van de bron of de waarnemer. De vraag of c ook wel overal en altijd hetzelfde is, is echter volstrekt zinloos. Om twee dingen te vergelijken die je niet naast elkaar kunt leggen, is er een meetstandaard nodig die tussen de metingen in niet verandert.

Het is wél een zinvolle vraag of de verhouding van twee grootheden met dezelfde dimensie altijd en overal hetzelfde is. Het resultaat is onafhankelijk van de gebruikte eenheden, het is een dimensieloos getal. Dit geldt ook voor getallen als de fijnstructuurconstante α , die een dimensieloze waarde heeft van ongeveer $1/137$. Die is in een ver verwijderde quasar of hetzelfde als nu en hier op aarde, of niet. Er bestaat maar een beperkt aantal (zo'n 25) fundamentele dimensieloze constanten,

waarop de huidige natuurkunde is gebaseerd. Dit zijn de massaverhoudingen van de elementaire deeltjes en de koppelingsparameters van de fundamentele wisselwerkingen. Er zijn vele andere dimensieloze constanten, die in de praktijk minder moeilijk of nauwkeuriger bepaald kunnen worden – zoals de massaverhouding van proton en elektron, die een gemeten waarde heeft van $1836,15267261(85)$ – maar die kunnen in principe van de fundamentele dimensieloze constanten worden afgeleid.



Figuur 2

Een gecombineerde fit aan alle gemeten schijnbare roodverschuivingen van waargenomen lijnen in PKS (○), Q0347 (△) en Q1232 (●) relatief ten opzichte van de extreem nauwkeurige laboratoriummetingen. Uit deze analyse volgt een zeer nauwkeurige bepaling van de roodverschuivingen: $z_{\text{PKS}} = 2,81080(10)$, $z_{\text{Q0347}} = 3,024890(3)$ en $z_{\text{Q1232}} = 2,337708(3)$. Verder geeft de richtingscoëfficiënt van de gefitte lijn de geschatte waarde van $\Delta\mu/\mu$ aan, waarbij volgt een waarde van $\Delta\mu/\mu = -(0,5 \pm 3,6) \cdot 10^{-5}$, waarbij de fout staat voor 2σ .

wolken nabij quasars bij grote roodverschuiving, verschuiven naar het zichtbare golflengtegebied, zodat ze met echelle-traliespectrometers gekoppeld aan grote telescopen kunnen worden waargenomen, met tamelijk hoge resolutie. Er zijn drie quasars waarvoor mooie hoge-resolutiespectra van H_2 zijn waargenomen: PKS-0528-250 bij roodverschuiving $z = 2,81$, Q1232+082 bij $z = 2,33$, en Q0347-382 bij $z = 3,02$.

Voor het vervolg van het verhaal is het van belang om in te zien dat elke spectraallijn in deze banden op een andere manier afhangt van een mogelijke verandering van de protonmassa. Ten eerste geldt dat de energie van elektronische excitatie in het moleculaire systeem schaalst met de elektronmassa en in de Born-Oppenheimer-benadering niet afhangt van de protonmassa (eigenlijk de dimensieloze μ). De gequantiseerde rotatie-energie van een molecuul schaalst met de inverse van het traagheidsmoment, dus met $1/M_p$. Voor de gequantiseerde vibratiebeweging (in de benadering van de harmonische oscillator) geldt een schaling met $\sqrt{1/M_p}$. Aangezien de bindingsenergieën in de grond- en aangeslagen toestand anders zijn (sterkere binding in de grondtoestand) zijn de schalingsparameters ook anders. Elke spectraallijn representeert nu een combinatie van een set quantumgetallen (v'', v', J'', J'), behorend bij vibratie en rotatie in grond- en aangeslagen toestand, en is daarom op een andere manier gevoelig voor een mogelijke verandering van μ . Die gevoe-

ligheid kan worden gequantificeerd en uitgedrukt in een gevoeligheidscoëfficiënt K_i . Verder kan worden aangetoond dat een vergelijking van spectraallijnen bij $z = 0$ (laboratoriummetingen) met golflengtes λ_i^0 en quasar-golflengtes λ_i voldoet aan:

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

waarbij z de roodverschuiving van een set quasardata is. Dus wat is het geval: iedere spectraallijn heeft een schijnbare roodverschuiving, die van lijn tot lijn kan verschillen, naarmate er een tijdsverandering van de proton-elektron-massaverhouding μ heeft plaatsgevonden.

LABORATORIUMMETINGEN

Voor een vergelijking van de spectraallijnen in quasarspectra met laboratoriumdata is het zaak zo nauwkeurig mogelijke $z = 0$ -posities te gebruiken. Tot voorheen werden de lijnposities uit een atlas van H_2 -emissielijnen gebruikt, gemeten op het Observatoire de Paris. Echter bij een vergelijking van quasarlijnen met deze data bleek dat de laboratoriumdata te onnauwkeurig waren. Daarom hebben wij in ons laboratorium in een twee jaar durend programma het absorptiespectrum van H_2 opnieuw gemeten met een smalbandige extreem-ultraviolet laser, leidend tot een nauwkeurigheid van 5×10^{-8} (zie figuur 1).

Voor elke vergelijking met astrofysische data kunnen deze laboratoriumdata als exact beschouwd worden. Op

basis van 81 lijnen, die vergeleken worden met lijnen waargenomen in de drie quasars (PKS, Q1232 en Q0347) in een gecombineerde analyse, is een bepaling mogelijk van een verandering van μ met een schatting van de onzekerheid (zie figuur 2).

Ons resultaat van $\Delta\mu/\mu = -(0,5 \pm 3,6) \cdot 10^{-5}$ (2σ) kan vertaald worden in een tijdafhankelijke variatie van $\Delta\mu/\mu = -(0,4 \pm 3,0) \cdot 10^{-15}$ per jaar (2σ), waarbij de roodverschuiving omgezet is in een gemiddelde terugkijktijd van twaalf miljard jaar, en verder aangenomen is dat een variatie constant zou zijn in de tijd. Dit resultaat is dus een nul-resultaat; wij tonen aan dat de massaverhouding niet verandert, althans niet binnen onze meetnauwkeurigheid [2]. Er zijn vele theorieën die aangeven hoe en waarom bepaalde constanten zouden moeten of kunnen veranderen. Daarbij is veel speculatie waar we niet op in zullen gaan. Er is wel een interessant perspectief dat in verschillende publicaties wordt aangegeven, zie onder andere [3]. Als wordt uitgegaan van unificatie van krachten dan zou de proton-elektron-massaverhouding ongeveer een factor veertig sneller veranderen dan de fijnstructuurconstante. Dat maakt metingen aan massaverhoudingen (waarbij baryonen en de sterke kracht een rol spelen) een gevoeliger probe voor detectie van variaties in fundamentele constanten.

TOEKOMST

Onze laboratoriummetingen vormen een set van data, die als standaard kunnen dienen voor verdere toekomstige

vergelijkingen met quasardata. Hierbij kunnen verbeterde telescopen en spectrometers een uitkomst bieden. Ook is het van belang om meer quasars met geprononceerde H_2 -lijnen te vinden, zodat ook gekeken kan worden naar de (an)isotropie van mogelijke effecten. Wijzelf zijn geïnteresseerd om in ons laboratorium, een meer gecontroleerde omgeving, extreme precisie metingen te verrichten om tijdsvariaties van de proton-elektron-massaverhouding op te sporen. Een ideaal testsysteem daarvoor is ook weer het H_2 -molecuul, echter niet de Lyman- en Werner-banden, maar de quadrupool-vibratieovergangen, die in het nabije infraroodgebied liggen. De vibratie-aangeslagen toestanden in H_2 hebben een levensduur in de orde van 10^6 s, en in potentie is het mogelijk om die met een twintigcijferige nauwkeurigheid te meten; dat is geen sinecure, maar wel een uitdaging waaraan we willen beginnen. Een van de noodzakelijke ingrediënten voor ijking van gemeten overgangsfrequenties hebben we inmiddels al in gereedheid. In het Lasercentrum VU is nu een frequentiekam (op basis van een fase-gestabiliseerde femtosecondelaser en een Rb-atoomklok met GPS-correctie) opgebouwd (door Kjeld Eikema), met op dit moment een twaalfcijferige precisie.

REFERENTIES

- 1 J.K. Webb et al., *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001), 091301.
- 2 W. Ubachs en E. Reinhold, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004), 101302.
- 3 X. Calmet en H. Fritsch, *Eur. J. Phys. C* **24** (2002), 639.