

Is er toch variatie van

De fundamentele natuurconstanten vormen het cement in het bouwwerk van de natuurkunde. Vooral de dimensieloze constanten zoals α (de fijnstructuurconstante) en μ (de proton-elektron-massaverhouding) spreken tot de verbeelding.

Volgens de huidige stand van de natuurkunde is $\alpha = 1/137,0359991$ (5) en $\mu = 1836,1526726$ (8). Elke vorm van theorie die deze waarden zou kunnen verklaren ontbreekt en veel grote fysici hebben zich hierover het hoofd gebroken. Pauli werd er zo door bezighouden, dat hij zijn overlijden arrangeerde in kamer 137 van het Rode Kruis Ziekenhuis in Zürich. Een andere kwestie is of α en μ altijd dezelfde waarden hebben gehad.

Daarover woedt al enige tijd een discussie in de wetenschappelijke literatuur sinds Dirac het probleem opbracht in de jaren dertig, waarbij het vooral gaat om α .

Onze bijdrage gaat over μ .

Wim Ubachs, Ruth Buning en
Elmar Reinhold

wimu@nat.vu.nl



Wim Ubachs promoveerde in Nijmegen en was later werkzaam in Dalian (China), Stanford en aan de ETH Zurich. Hij is momenteel hoogleraar Atoom-, Molecuul- en Laserfysica aan de VU en directeur van het Laser Centrum VU.



Ruth Buning is studente Masters in Physics aan de VU. Zij werkte aan dit onderwerp voor haar bachelorsopdracht en is nu betrokken bij het bouwen van een moleculaire fontein in het Laser Centrum VU.



Elmar Reinhold promoveerde aan de VU op het onderwerp XUV-laserspectroscopie van moleculair waterstof, en was daarna als Marie Curie-fellow werkzaam in Parijs. Na een postdocperiode aan het Laser Centrum VU is hij nu verbonden aan ESA in Noordwijk.

Elementaire molecuulfysische methoden leren ons dat vibratie-energieën in een molecuul schalen met $\sqrt{1/\mu}$ en rotatie-energieën met $1/\mu$, terwijl de elektronische energie nauwelijks van μ afhankelijk is.

Omdat echter de ligging van de spectraallijnen in de karakteristieke Lyman- en Werner-banden afhangt van de vibratie (en de rotatie), hebben alle lijnen in het spectrum van moleculair waterstof een specifieke afhankelijkheid van μ . De massa-afhankelijkheid van alle energieniveaus – en dus ook van de spectraallijnen – wordt uitgedrukt in een gevoeligheidsfactor K_i : als een spectraallijn een grote K_i heeft, dan heeft ze een grote isotopieverschuiving en dus een grote massa-afhankelijkheid.

Twee jaar geleden vergeleken wij spectraallijnen in H_2 , gemeten in het laboratorium, met dezelfde lijnen waargenomen in quasars met grote roodverschuiving. Deze karakteristieke spectraallijnen van H_2 liggen (zonder roodverschuiving, $z = 0$) in het extreme ultraviolet (90–100 nm), terwijl de lijnen bij grote roodverschuiving ($z \sim 3$) netjes in het zichtbare golflengtegebied komen te liggen, waar met echelle-roosterspectrometers, gekoppeld aan grote telescopen, het spectrum met grote nauwkeurigheid bepaald kan worden. Indertijd kon een bovenlimiet voor een mogelijke verandering van de proton-elektron-massaverhouding worden gegeven van $\Delta\mu/\mu = -(0,5 \pm 1,8) \times 10^{-5} (1\sigma)$ [1]. In die vergelijking werd uitgegaan van 81 spectraallijnen waargenomen in drie quasars bij roodverschuivingen tussen 2,3 en 3,0. Dat komt overeen met een terugkijktijd van 12 miljard jaar, als we de levensduur van het heelal op 13,7 miljard jaar zetten. Met een fout die groter is

dan het gefitte, vonden we dus geen indicatie voor een verandering van μ .

In de tussentijd zijn de methoden op een aantal fronten verfijnd. In het laboratorium wisten we onze ijkstandaard naar lange golflengten uit te breiden, zodat we ook in het golflengtegebied tussen 105 en 110 nm het spectrum van H_2 hebben kunnen meten met een nauwkeurigheid van 5×10^{-8} . Zo hebben we de golflengten van negentien belangrijke, nog missende lijnen kunnen bepalen. Verder hebben we de bepaling van de gevoeligheidscoëfficiënten K_i eens goed onder de loep genomen. Op basis van de nieuwe laboratoriumgegevens is een analyse uitgevoerd, waarbij ook storingen (niet-Born-Oppenheimer-effecten) zijn meegenomen, resulterend in een nieuwe bepaling van K_i 's, nauwkeurig binnen 5 à 10%.

De nieuwe laboratoriumdata en de K_i -coëfficiënten zijn losgelaten op een nieuw waargenomen set van 76 spectraallijnen, in twee quasarsystemen (Q0347 bij $z = 3,024899$ en Q0405 bij $z = 2,5947332$). Met behulp van de UVES-spectrometer op de Very Large Telescope in Chili heeft een team van sterrenkundigen, geleid door Patrick Petitjean (Observatoire de Paris) en Alexander Ivanchik (Ioffe Instituut, St. Petersburg) overgangsfrequenties in H_2 -moleculen bepaald met een nauwkeurigheid van $0,2\text{--}1,0 \times 10^{-6}$. Dat is de nauwkeurigste set die nu voorhanden is.

In de vergelijkende analyse is voor elke lijn een schijnbare roodverschuiving bepaald. Door schaling op de roodverschuiving van de totale absorberende wolk, worden gereduceerde roodverschuivingen ζ_i voor elke lijn bepaald. Dat wordt gedaan opdat lijnen van verschillende quasars in één alomvattende analyse meegenomen kunnen worden. De gereduceerde roodverschuivingen beschrijven de effecten van een eventuele verandering $\Delta\mu$:

natuurconstanten?

$$\zeta_i = \frac{\Delta\mu}{\mu} K_i.$$

De data zijn uitgezet in de figuur, waarbij de helling van de lijn de relatieve verandering in μ zou moeten aangeven. Waar het dus bij deze vorm van analyse om gaat is, dat als gevolg van een mogelijke variatie van μ , elke spectraallijn een andere schijnbare roodverschuiving heeft. Als resultaat van een gewogen fit vinden we $\Delta\mu/\mu = (2,44 \pm 0,59) \times 10^{-5} (1\sigma)$ [2]; de uitkomst van een ongewogen fit geeft een vergelijkbaar resultaat. Verder zijn er nadere tests op de gegevens uitgevoerd, die mogelijk systematische effecten aan het licht kunnen brengen. Een test op correlatie met H₂-temperatuur in de ab-

sorberende wolken (afzonderlijke sets van rotatiequantumgetallen) was negatief. Ook een mogelijke correlatie met golflengte in plaats van K_i was negatief; als een gravitationele roodverschuiving in het spel zou zijn, dan zou dat in eerste benadering variëren met energie (oftewel golflengte), en dat zien we niet. Een robuustheidstest van de fit geeft aan dat het resultaat niet door uitbijters geproduceerd wordt. Ook geven analyses voor de data van de twee afzonderlijke quasars een vergelijkbaar resultaat.

Hoe interpreteren wij nu dit resultaat, dat statistisch gezien een marge heeft van 3,5 standaarddeviatie. Voor ons is het een indicatie dat de proton-elektron-massaverhouding met 0,002% kleiner

geworden kan zijn in de afgelopen 12 miljard jaar. Toekomstige observaties aan meer quasarsystemen, mogelijk bij hogere nauwkeurigheid, zullen leren of dit inderdaad het geval is.

REFERENTIES

- 1 W. Ubachs en E. Reinhold, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004), 101302; *NTvN* **70-6** (2004), 208.
- 2 E. Reinhold, R. Buning, U. Hollenstein, A. Ivanchik, P. Petitjean en W. Ubachs, *Phys. Rev. Lett.* **96-15** (2006), 151101.

De gereduceerde roodverschuiving ζ_i uitgezet als functie van de gevoeligheidscoëfficiënt K_i voor 76 spectraallijnen. Open cirkels: Q0405-443-quasar. Zwarte cirkels: Q0347-383-quasar. De gestreepte lijn is het resultaat van een gewogen fit, en de gestippelde lijn van een ongewogen fit.

