Een ontspannend bad voor complexe ionen

Onderzoekers van de Universiteit van Amsterdam hebben een nieuwe manier getoond om precisiespectroscopie uit te voeren op ionen (elektrisch geladen atomen) die moeilijk te koelen zijn met lasers. Door één ytterbiumion onder te dompelen in een ultrakoud bad van lithiumatomen, bereikten ze metingen die zes tot negen keer nauwkeuriger zijn dan met een conventionele opstelling met een ontladingscel.

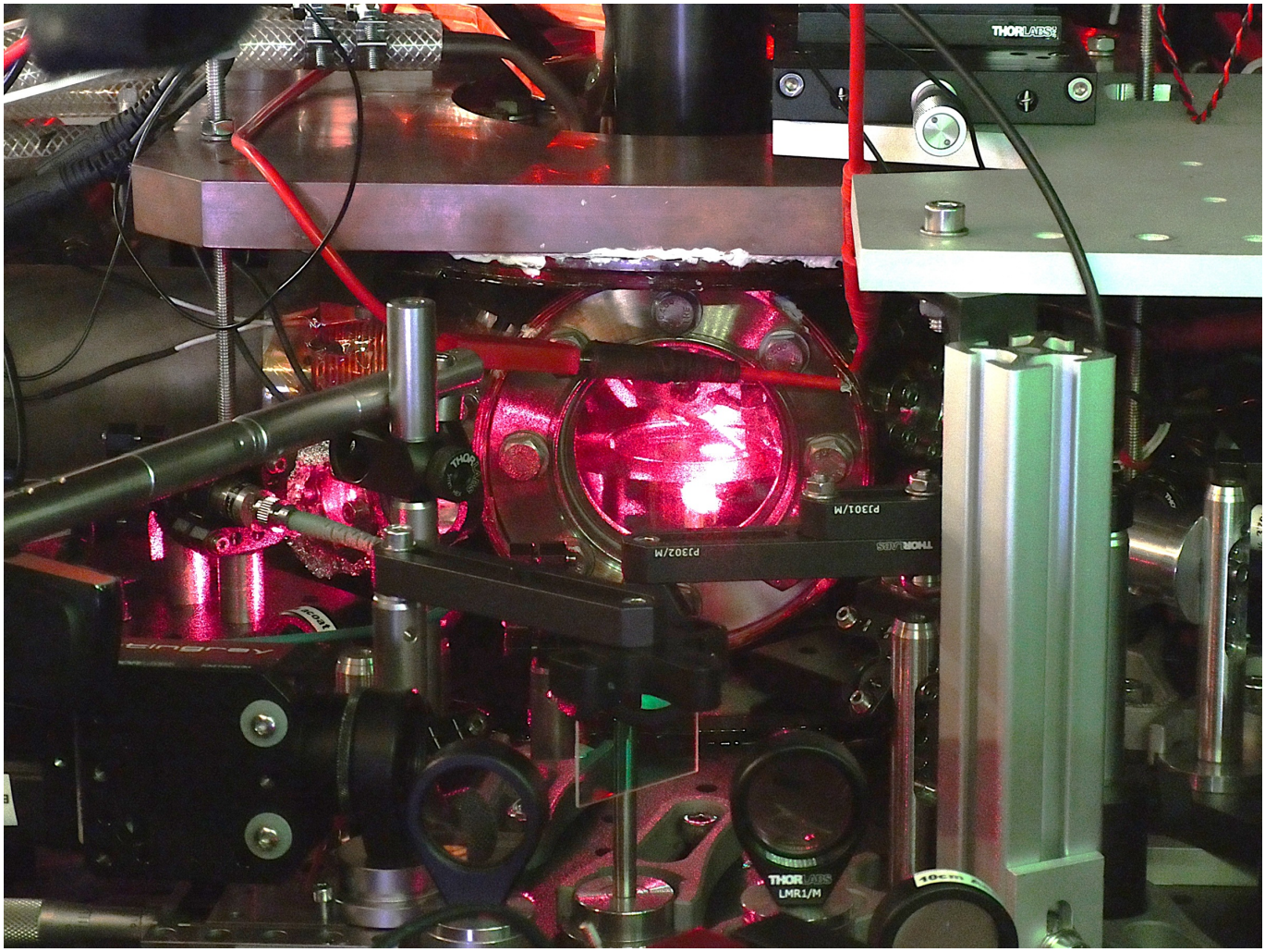


Foto van de experimentele opstelling. Het lithiumbad en de vastgehouden ionen bevinden zich in de roze gloed die door het venster van de vacuümkamer te zien is. Beeld:

Universiteit van Amsterdam.

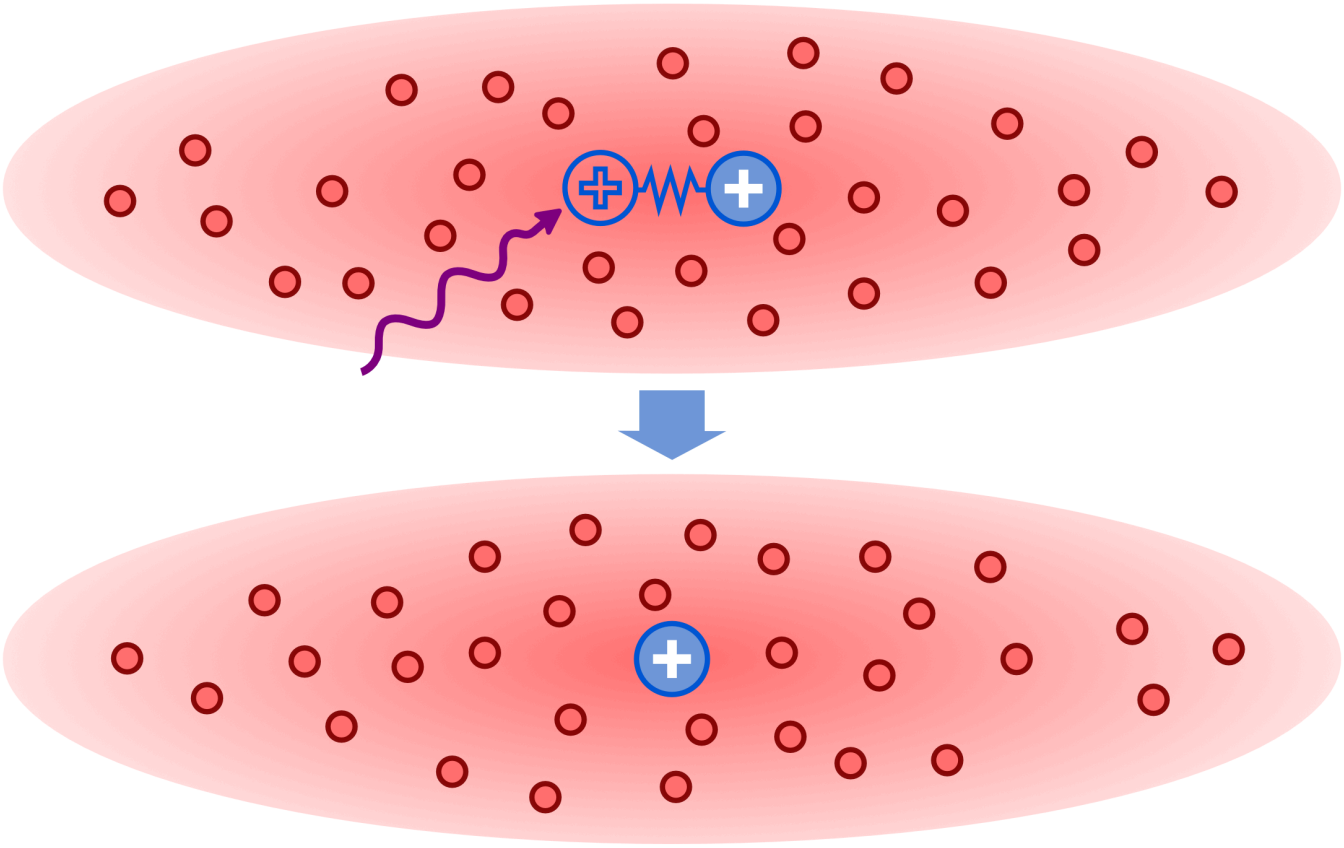
Elektronen in een ion kunnen zich bevinden in veel verschillende, dicht bij elkaar liggende energieniveaus. Deze niveaus kunnen worden onderzocht met laserspectroscopie, waarbij wordt nagegaan hoe afzonderlijke ionen reageren op laserlicht met specifieke golflengten. Zulke metingen kunnen wetenschappers helpen hun modellen van de atoomstructuur te verbeteren, ultrastabiele atoomklokken te bouwen en zelfs naar nieuwe natuurkunde te zoeken.

Voor zulke precisiemetingen moet het ion echter vrijwel tot stilstand worden gebracht. Daarvoor moet bij extreem lage temperaturen worden gewerkt, moeten de ionen vastgehouden worden door een elektrisch veld en moeten botsingen met andere deeltjes worden beperkt.

Sinds de jaren tachtig is laserkoeling een standaardmethode om opgesloten ionen af te remmen. Een ion absorbeert laserlicht en zendt vervolgens licht uit in een willekeurige richting, waardoor zijn beweging langs de laserbundel geleidelijk afneemt.

Deze techniek werkt echter slechts voor een handvol soorten ionen. In complexere ionen kan een elektron gedurende het experiment vast komen te zitten in een langlevende ‘metastabiele’ energietoestand. Er zijn dan extra lasers nodig om het elektron terug te brengen naar het laagst beschikbare energieniveau, waardoor het experiment steeds ingewikkelder wordt.

In plaats van een grote en complexe reeks lasers kan een koud buffergas worden gebruikt. Net zoals een voorwerp warmte verliest in een koud bad, verliest het opgesloten ion energie en kan het door herhaalde botsingen met de atomen in het bad terugkeren naar zijn laagste-energie ‘grondtoestand’. Helaas zijn gangbare buffergassen, zoals cryogeen helium, simpelweg niet koud genoeg om veel complexe ionen tot hun grondtoestand af te koelen.



Illustratie van het experiment. Een ytterbium-173-ion en een naburig ytterbium-174-ion zijn ondergedompeld in een bad van ultrakoude lithiumatomen. Het ytterbium-173-ion wordt onderzocht met laserlicht, terwijl het tweede ion de onderzoekers helpt te detecteren wanneer het uit de val ontsnapt. Beeld: Egor Kovlakov.

De Amsterdamse natuurkundigen Egor Kovlakov en René Gerritsma gebruikten daarom een met lasers gekoeld buffergas van lithiumatomen. Dankzij de laserkoeling bereikte het buffergas temperaturen van slechts enkele microkelvin, miljoensten van een graad boven het absolute nulpunt. Dat is veel lager dan wat met cryogene systemen kan worden bereikt.

Vervolgens dompelden ze een ytterbium-173-ion ($^{173}Yb^{+}$) onder in dit ultrakoude bad en gebruikten het om hun nieuwe spectroscopietechniek te demonstreren.

De onderzoekers dompelden één ytterbium-173-ion onder in het ultrakoude lithiumgas en beschenen het met pulsen laserlicht. Het ion absorbeerde alleen licht bij golflengten die overeenkomen met de verschillen tussen de energieniveaus van zijn elektronen.

Na het absorberen van licht kon het ytterbiumion een elektron van een lithiumatoom invangen en uit de val ontsnappen. De onderzoekers merkten zijn verdwijning op aan de

verplaatsing van een naburig ytterbium-174-ion. Door vast te leggen bij welke golflengten dit gebeurde en het experiment vaak te herhalen, konden ze een deel van de energieniveaustructuur van ytterbium-173 reconstrueren.

“Het experiment is een principebewijs. Ytterbium-173 kan al met conventionele laserkoeling worden onderzocht, maar de nieuwe techniek zou uiteindelijk precisiemetingen aan veel complexere ionen mogelijk kunnen maken,” zegt Gerritsma.

De onderzoekers zien nu al verschillende manieren om de techniek verder te verbeteren. Gerritsma: “De meest voor de hand liggende verbetering is de keuze van het buffergas. Lithium is wel gemakkelijk tot ultrakoude temperaturen te koelen, maar het is ook zeer reactief.”

De reactiviteit van lithium maakt de huidige detectiemethode mogelijk, maar betekent ook dat het gemeten ion verloren gaat. Met een minder reactief buffergas zouden onderzoekers metingen aan hetzelfde ion kunnen herhalen en de nauwkeurigheid verder kunnen verbeteren.

Op zoek naar het ideale ultrakoude gas

Een ideaal buffergas moet licht zijn, chemisch stabiel, gemakkelijk te koelen en in staat zijn het ion te helpen zijn elektronische toestand te resetten naar de grondtoestand. Het juiste soort gas vinden is lastig, maar de onderzoekers wijzen chroom aan als een bijzonder veelbelovende kandidaat.

“Helaas ziet geen van de lichtste atomen er bijzonder aantrekkelijk uit voor deze toepassing,” merkt Gerritsma op. “Waterstof vereist extreem-ultravioletlasers, terwijl helium alleen in zijn metastabiele toestand microkelvintemperaturen kan bereiken. Zo’n metastabiel buffergas zou heftig reageren met elk spectroscopie-ion dat het tegenkomt. Als je het periodiek systeem langsloopt, blijkt het lichtste atoom dat aan alle eisen voldoet chroom te zijn.”

De methode zou uiteindelijk kunnen worden toegepast op complexe ionen, zoals enkelvoudig geïoniseerd gadolinium en dysprosium. Deze elementen hebben veel isotopen en zijn daardoor veelbelovende kandidaten voor King-plotanalyse, waarbij onderzoekers subtiele

verschuivingen in spectraallijnen tussen isotopen vergelijken. Onverwachte afwijkingen van het voorspelde patroon zouden kunnen wijzen op een nog onbekende interactie tussen neutronen en elektronen.

De methode zou ook kunnen werken voor precisiespectroscopie aan bepaalde moleculaire ionen, mits de chemische reactiesnelheden laag genoeg zijn.

Publicatie

Precision spectroscopy of a trapped ion using a bath of ultracold atoms, E. Kovlakov en R. Gerritsma. Physical Review Letters **137** (2026) 223201.