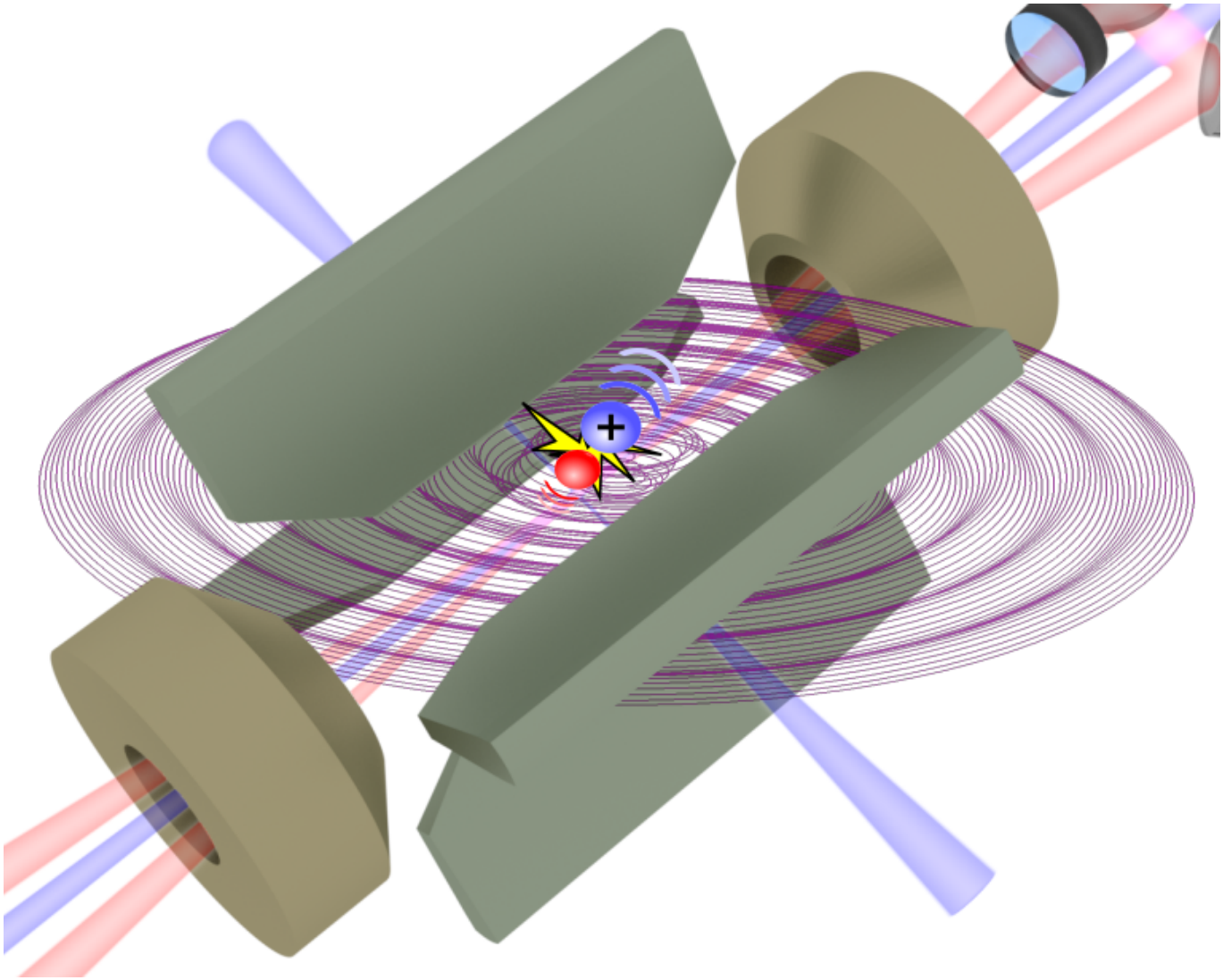
Quantum-koude ionen en atomen

In de afgelopen jaren hebben natuurkundigen technieken ontwikkeld om extreem koude atomen en ionen te maken. Deze ultra-koude deeltjes hebben allerlei toepassingen: ze kunnen bijvoorbeeld gebruikt worden als bouwstenen voor quantumcomputers en heel nauwkeurige klokken. Idealiter zou men voor zulke toepassingen ook de beschikking willen hebben over mengsels van koude atomen en ionen, maar tot nu toe was het alleen mogelijk om de afzonderlijke soorten deeltjes af te koelen tot de benodigde temperaturen. Een groep natuurkundigen van de Universiteit van Amsterdam is er nu in geslaagd om een dergelijk ultra-koud mengsel te maken. Hun resultaten zijn deze week gepubliceerd in Nature Physics.



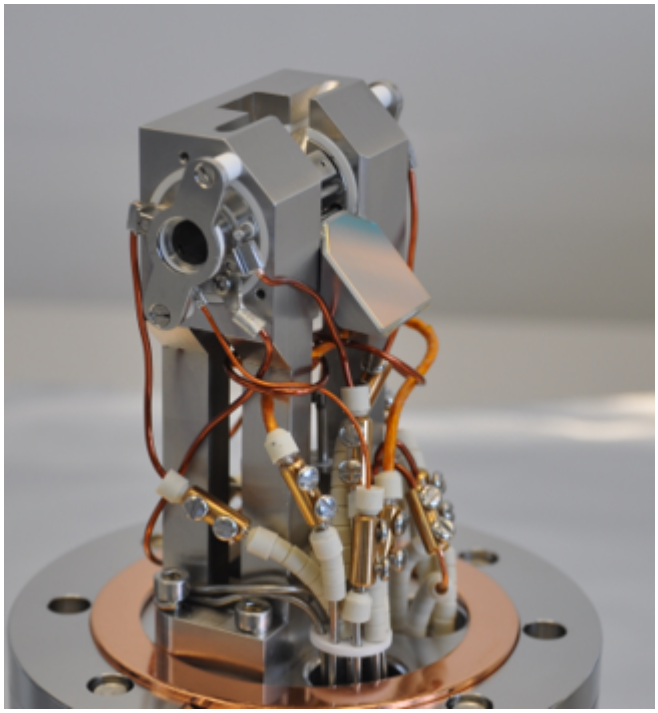
Artistieke impressie van de experimentele opstelling.De atomen worden door laserstralen op hun plaats gehouden; het ion door elektrische velden. De botsingen tussen de atomen en het ion betreden terwijl het ion afkoelt het quantumregime. Afbeelding: R. Gerritsma et al.

Ultrakoude gassen van ongeladen atomen worden vandaag de dag routinematig geprepareerd bij temperaturen lager dan 100 nanokelvin – dat wil zeggen: minder dan een tienmiljoenste graad boven het absolute nulpunt van temperatuur – in laboratoria over de hele wereld. Wat ionen betreft, atomen die een lading hebben omdat ze een elektron “missen”: met behulp van de laserkoeling-techniek kunnen ook die afgekoeld worden tot aan hun bewegingstoestand met de laagst mogelijke energie. Door deze ontwikkelingen zijn zowel atomaire als ionische systemen vooraanstaande quantumtechnologieën gericht op het ontwikkelen van quantumcomputers en ultra-precieze atoomklokken.

Quantumregime

Ook over het *combineren* van ionen en atomen tot een enkel quantumsysteem wordt als geruime tijd nagedacht. Ondanks grote inspanningen gedurende de afgelopen tien jaar is het maken van een quantummengsel van atomen en ionen echter een onbereikbaar doel gebleven – dat wil zeggen: tot nu toe. In een publicatie die deze week in Nature Physics verscheen [1] melden IoP-natuurkundige Thomas Feldker en zijn collega's in de groep van Rene Gerritsma dat ze een atoom-ionmengsel hebben waargenomen bij een temperatuur die zo laag is dat het systeem niet meer met de klassieke natuurwetten beschreven kan worden.

In het experiment dompelden de onderzoekers een enkel gevangen ion onder in een wolk van zo'n tienduizend atomen met een temperatuur van een paar microkelvin. Met behulp van technieken die ontwikkeld werden voor gevangen ionen in quantumcomputers konden ze de bewegingsenergie van het ion in de gaten houden terwijl het werd afgekoeld door het bad van atomen. Het zou voor de hand liggen dat het ion na een aantal botsingen dezelfde temperatuur krijgt als het atomenbad, maar de oscillerende elektrische velden die het ion op zijn plaats gevangen houden maken de situatie ingewikkelder. Door deze elektrische velden kan er namelijk juist warmte ontstaan als het ion met een atoom botst. Vanwege dit effect was het tot nu toe niet mogelijk om een mengsel van atomen en ionen in het quantum-temperatuurregime te maken.



De ‘val’ waarin de ionen worden gevangen.Foto: R. Gerritsma et al.

Smoking gun

Enkele jaren geleden werd door een groep wetenschappers van het MIT [2] berekend dat deze ongewenste verwarmingseffecten konden worden verzacht door een heel zwaar ion te mengen met atomen die juist heel licht zijn. In het experiment in Amsterdam werd daarom een enkel ytterbium-ion ($^{171}Yb^{+}$) ondergedompeld in een wolk van lithium-atomen (^{6}Li). Deze combinatie heeft, van alle atoom- en ionsoorten die goed met lasers te manipuleren zijn, de grootste verhouding tussen de massa’s. De onderzoekers maten de bewegingsenergie van de atomen en het ion in alle bewegingsrichtingen en concludeerden dat de botsingsenergie tussen de atomen en het ion de zogeheten s-wave-limiet bereikt. In dit regime is de quantumtheorie noodzakelijk om de botsing te kunnen beschrijven. Als ‘smoking gun’ presenteren de auteurs metingen aan botsingen tussen de atomen en het ion waarin ion en atoom wisselen van ‘spintoestand’, een quantummechanische eigenschap die verband houdt met de rotatie van de deeltjes. Deze botsingen schenden de klassieke resultaten afkomstig uit een beschrijving die bekend staat als Langevintheorie – een duidelijke aanwijzing voor het feit dat in de botsingen ook quantumverschijnselen een rol spelen. Door hun meetgegevens te fitten met theoretische voorspellingen, ontwikkeld in de groep van dr. Tomza in Warschau, berekenen de auteurs de verstrooiingslengtes – parameters die de quantumverstrooiing volledig bepalen.

De resultaten effenen de weg naar allerlei nieuwe mogelijkheden, zoals het onderzoek van kort-bestaande configuraties van atomen en ionen die bekend staan als magneto-moleculaire resonanties. Deze configuraties, ook wel *Feschbach-resonanties* genoemd, zijn het werkpaard van de quantumsimulatoren die uit alleen atomen bestaan, maar zijn nog nooit waargenomen tussen atomen en ionen, aangezien de benodigde temperaturen eenvoudigweg buiten bereik waren. Het nu gemaakte mengsel van atomen en ionen zou daarom als nieuw platform kunnen dienen voor quantumsimulaties van veeldeltjesverschijnselen zoals het natuurkundige gedrag van geladen oneffenheden die wisselwerken met een quantumvloeistof. Een verdere interessante mogelijkheid is het gebruik van een wolk van koude atomen om een quantumcomputer die gebruik maakt van koude ionen doorlopend te koelen.

Referenties

[1] *Buffer gas cooling of a trapped ion to the quantum regime*, T. Feldker, H. Fürst, H. Hirzler, N. V. Ewald, M. Mazzanti, D. Wiater, M. Tomza and R. Gerritsma, Nature Physics (2020). https://www.nature.com/articles/s41567-019-0772-5

[2] *Micromotion-Induced Limit to Atom-Ion Sympathetic Cooling in Paul Traps*, Marko Cetina, Andrew T. Grier, and Vladan Vuletić, Phys. Rev. Lett. 109, 253201 (2012). https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.109.253201