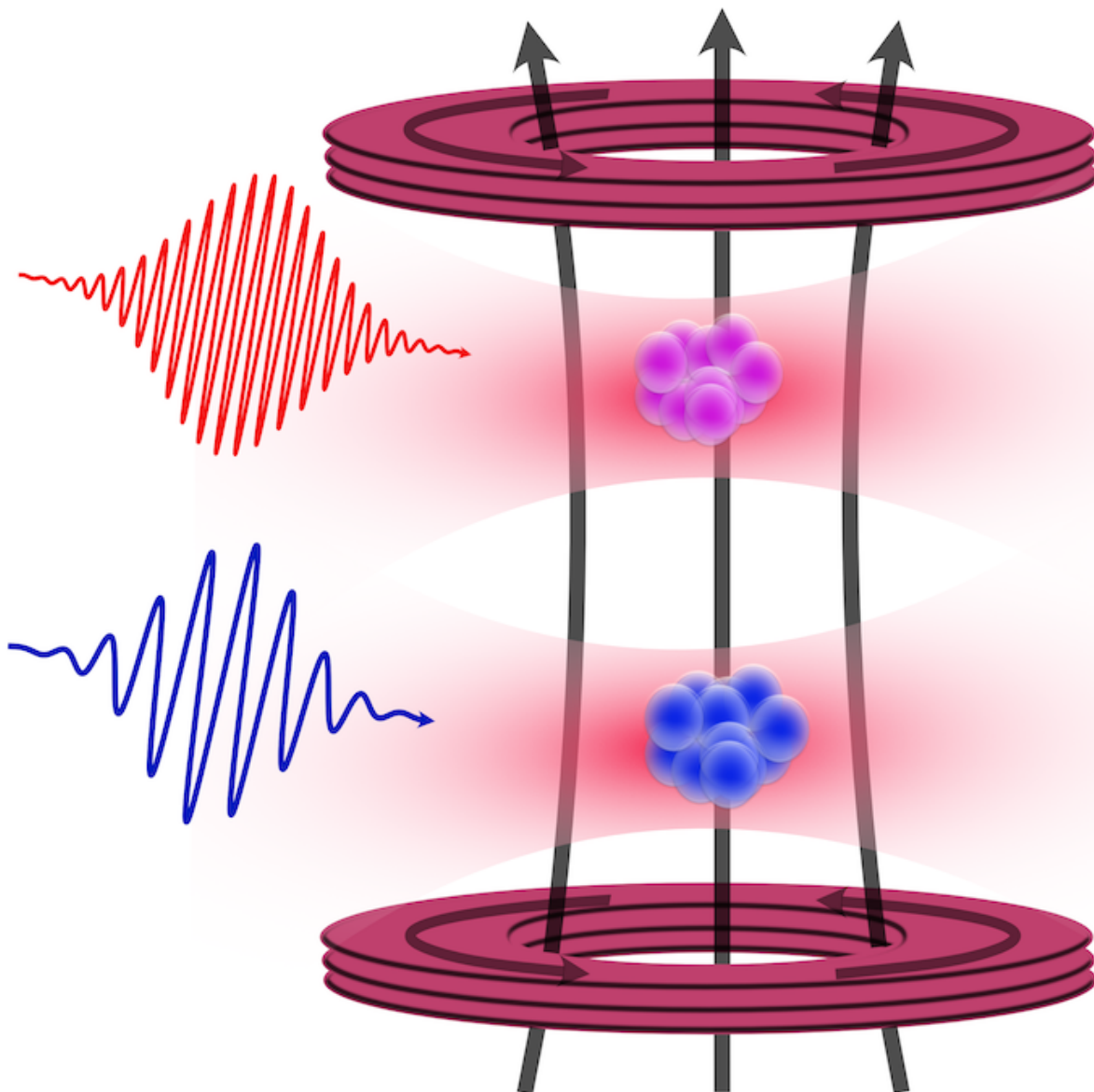


De waarde van een goede buur

Goede burenen kunnen heel waardevol zijn - ook in de wereld van de atomen. Een team van natuurkundigen heeft een belangrijke eigenschap van strontiumatomen, een nuttig element voor moderne toepassingen in atoomklokken en quantumcomputers, met ongekeerde precisie kunnen bepalen. Om dit voor elkaar te krijgen maakten de wetenschappers slim gebruik van een nabijgelegen wolk van rubidiumatomen.



Strontium en rubidium. Kleine wolkjes strontiumatomen (blauw) en rubidiumatomen (rood) zitten samen opgesloten in een magneetveld. De bekende eigenschappen van rubidium kunnen worden gebruikt om het aangelegde veld heel nauwkeurig te kalibreren, waardoor de eigenschappen van strontium extreem nauwkeurig kunnen worden gemeten.

Strontium. Het is misschien niet het meest bekende chemische element, maar onder een groep natuurkundigen heeft strontium een betere reputatie - en met recht.

Strontium is een van de zes zogenaamde aardalkalimetalen, wat betekent dat het element eigenschappen deelt met bekendere verwanten als magnesium, calcium en radium. Strontiumatomen hebben 38 protonen in hun kern, en een wisselend aantal neutronen – voor de varianten (*isotopen*) van strontium die in de natuur voorkomen, zijn dat er 46, 48, 49 of 50.

Iemand met wiskundige aanleg zou nu kunnen opmerken dat slechts één van deze getallen, 49, oneven is. Hoewel dat misschien een merkwaardige observatie lijkt, is het juist die specifieke isotoop van strontium, degene met in totaal 87 deeltjes in de kern, die de bijzonderste eigenschappen heeft. Het oneven aantal deeltjes verandert de kern in iets wat bekend staat als een *fermion*, terwijl alle andere strontiumkernen *bosonen* zijn. Belangrijk is dat het oneven aantal de kern bovendien verandert in een kleine staafmagneet, door een eigenschap die *spin* wordt genoemd. Hoewel alle subatomaire deeltjes spin hebben, kunnen de twee spins van een paar identieke deeltjes elkaar volledig opheffen, wat leidt tot een totale spin van nul. Dit is precies wat er gebeurt in de bosonische isotopen van strontium, waar de totale spin van elk van de subatomaire deeltjessoorten (protonen, neutronen en elektronen) nul wordt, met als gevolg dat ook de totale spin van het atoom nul is. Het is het fermionische strontiumatoom dat, door zijn kernspin ongelijk aan nul, de bijzondere eigenschappen heeft die natuurkundigen al jarenlang inspireren.

Atoomklokken en quantumcomputers

Om te beginnen is ^{87}Sr , zoals de isotoop wordt afgekort, een van de belangrijkste kandidaat-isotopen voor gebruik in de volgende generatie atoomklokken – de zogeheten *optische* klokken. Zulke klokken ontleen hun extreme timingprecisie aan heel nauwkeurig bepaalde

frequenties van licht dat atomen uitzenden of absorberen. Die emissie of absorptie ontstaat wanneer het atoom van de ene toestand naar de andere overgaat. In het strontiumatoom komt de meest precieze optische frequentie overeen met helder, rood licht met een golflengte van 698 nanometer. Het probleem met de bosonische versies van het atoom is echter dat de regels voor (nul-) spin strikt de emissie of absorptie verbieden bij wat anders de ideale overgang zou zijn. Hier komt de kernspin van de fermionische isotoop te hulp. De kernmagneet die ontstaat door de spin van ^{87}Sr maakt het mogelijk om de spinregels net genoeg te “overtreden” – maar niet té veel – zodat de optische klokovertgang geschikt is voor absorptie en emissie, waarbij de frequentie heel goed gedefinieerd en stabiel blijft. Daarmee is de sterkte van de kernmagneet in ^{87}Sr een belangrijke parameter voor de werking van de klok.

Zo komen we bij een effect dat in 1896 werd ontdekt door de Nederlandse Nobelprijswinnaar Pieter Zeeman, en dat tegenwoordig bekendstaat als het *Zeemaneffect*. In zijn oorspronkelijke vorm beschrijft dit effect de splitsing van de verschillende energieniveaus waarin de elektronen van een atoom zich kunnen bevinden, waardoor uitgaande fotonen – lichtdeeltjes – diverse verschillende, maar nauwkeurig te bepalen frequenties kunnen hebben. Op een meer technisch niveau treedt hetzelfde Zeemaneffect op in een atoomkern met spin, en de sterkte van de kernmagneet bepaalt dan de mate van splitsing en de specifieke radiofrequentie (een veel laagfrequentere vorm van licht) waarmee de kernmagneet van de ene toestand naar de andere kan worden omgezet. Zoals gezegd speelt dit magnetische moment een sleutelrol in de werking van de optische klok, en de nauwkeurige bepaling ervan kan onderzoekers helpen de kalibratie van een dergelijke klok te verbeteren.

Nog een bijzondere eigenschap van de ^{87}Sr -kern is dat, wanneer een magnetisch veld wordt aangelegd, het energieniveau zich door het Zeemaneffect splitst in maar liefst tien (gelijk verdeelde) energieniveaus. Die tien verschillende toestanden waarin de kern zich kan bevinden, kunnen worden gebruikt als bouwstenen voor een quantumcomputer. Waar een klassieke computer *bits* gebruikt die zich in twee toestanden kunnen bevinden – meestal geïnterpreteerd als “0” en “1”, gebruikt een quantumcomputer *qubits* die zich ook in een gecombineerde toestand kunnen bevinden – grofweg “een beetje 0 en een beetje 1”. Dit idee van een qubit (en vooral het gecontroleerd kunnen combineren van veel van deze qubits)

maakt quantumcomputers bij het uitvoeren van bepaalde berekeningen veel krachtiger dan klassieke computers. Het tienvoudig gedegenereerd zijn (en de tienvoudige splitsing in een magnetisch veld) van de ^{87}Sr -toestanden opent echter de mogelijkheid om ook *qudits* te gebruiken – varianten op qubits die zich in combinaties van toestanden “0”, “1”, “2”... tot en met “9” kunnen bevinden. Voor quantumcomputers en quantumsimulators zouden zulke qudits nog veelzijdiger bouwstenen kunnen zijn.

De g-factor

In al deze toepassingen speelt het Zeemaneffect een centrale rol. Om de potentiële toepassingen van strontium optimaal te benutten, willen natuurkundigen daarom zo nauwkeurig mogelijk weten in welke mate de energieniveaus van ^{87}Sr splitsen. Met andere woorden: wat is de sterkte van de kernmagneet die door de spin wordt gegenereerd? De mate van splitsing wordt bepaald aan de hand van een grootheid die bekend staat als de *g-factor* van ^{87}Sr , en het is dus zaak om deze g-factor zo nauwkeurig mogelijk te bepalen. De kleine lettertjes: de waarde van de g-factor hangt niet alleen af van de magnetische eigenschappen van de kern, maar ook van de kleine magnetische afscherming door de elektronenwolk die samen met de kern het neutrale atoom vormt. Het berekenen van de afscherming tot de gewenste nauwkeurigheid is een schijnbaar onoverkomelijke uitdaging, en daarom is een nauwkeurige meting cruciaal.

Heel nauwkeurige metingen van de g-factor werden meer dan vijftig jaar geleden al uitgevoerd, en die metingen hebben tot nog toe de tand des tijds doorstaan: er werd sindsdien geen enkele verbetering meer bereikt. Nu is een team van vijf natuurkundigen van de Universiteit van Amsterdam en het quantumsoftware-onderzoekscentrum QuSoft er echter in geslaagd om de bekende waarde met een factor honderd te verbeteren.

Zoals vaak gebeurt, kwam de doorbraak uit onverwachte hoek. Eerste auteur Premjith Thekkepatt, die als promovendus in de Amsterdamse groep aan het onderzoek werkte en nu postdoctoraal onderzoeker is aan het Niels Bohr Instituut in Kopenhagen, legt uit: “Ons werk is voortgekomen uit pogingen om strontiumatomen te combineren met een ander element, rubidium, om zo rubidium-strontiummoleculen te creëren. Dat bleek een enorme uitdaging, wat ons ertoe aanzette te onderzoeken wat we konden bereiken door de twee soorten atomen in elkaars nabijheid te plaatsen, zonder dat de atoomwolken overlaptten. Met

behulp van een techniek die *optisch vangen* heet, konden we een dergelijke configuratie bereiken.”

Het bleek dat het “opsluiten” van ^{87}Sr , en dichtbij hetzelfde doen met rubidiumatomen, niet direct hielp bij het vormen van de gewenste moleculen, maar bij gebruik van een meettechniek die bekend staat als *kernspinresonantie* (in essentie het meten van de frequentie die overeenkomt met de energiesplitsing), hielp het wel bij het heel nauwkeurig bepalen van de g-factor, en daarmee bij het bepalen van de precieze grootte van het Zeemaneffect. De reden is dat de eigenschappen van rubidium al extreem nauwkeurig bepaald waren, waardoor die eigenschappen konden worden gebruikt om de magnetische veldsterkte in het vacuüm waar beide atoomtypen gevangen zaten nauwkeurig te kalibreren. Dit maakte op zijn beurt de sterk verbeterde bepaling van de g-factor van ^{87}Sr mogelijk.

Een uitdagend ijkpunt

De nieuw bereikte precisie opent niet alleen deuren voor nauwkeurigere strontiumgebaseerde toepassingen in atoomklokken en quantumcomputers, maar kan ook leiden tot andere stappen voorwaarts. Thekkeppatt: “Onze resultaten vormen een nieuw, uitdagend ijkpunt voor atomaire structuurberekeningen. We hebben aangetoond dat deze nieuwe methode heel goed werkt voor precisiemetingen, en de ontwikkelde methode zal onderzoekers inspireren tot uitbreidingen naar andere atoomsoorten en -toestanden die relevant zijn voor allerlei toepassingen.”

Publicatie

[*Measurement of the factor of ground-state Sr at the parts-per-million level using co-trapped ultracold atoms*](#). Premjith Thekkeppatt, Digvijay, Alexander Urech, Florian Schreck and Klaasjan van Druten, Physical Review Letters **135** (2025), 193001. ([arXiv: 2504.11242](#))