

OP ZOEK NAAR DE GRENZEN VAN DE QUANTUMFYSICA MET ULTRAKOUD HELIUM



Als er één ontdekking de natuurkunde de afgelopen honderd jaar heeft vormgegeven, dan is het wel de quantummechanica. Naast grote technologische vooruitgang heeft de quantummechanica tot fundamenteel inzicht geleid in het gedrag van atomen en moleculen en van de elementaire deeltjes binnen het standaardmodel. Aan de hand van precisiespectroscopie in helium hebben wij gezocht naar aanwijzingen voor nieuwe natuurkunde, door te speuren naar afwijkingen tussen experiment en theorie in de kleinste decimalen. De daartoe vereiste experimentele nauwkeurigheid vergt een diepgaand begrip van allerlei quantummechanische verschijnselen, waarvan sommige nog niet eerder zijn waargenomen.

Theorie en experiment

Het standaardmodel geeft een succesvolle beschrijving van een groot deel van het zichtbare universum, maar dankzij ontdekkingen als donkere materie en donkere energie weten we dat hiermee de natuurkunde niet volledig beschreven is. Met enorme telescopen en deeltjesversnellers zoeken natuurkundigen daarom naar nieuwe fysica, door de grenzen van lengte- en energieschalen op te zoeken. Het is echter ook mogelijk om de grenzen van de precisie te verkennen en op zoek te gaan naar nog onbekende verschijnselen in afwijkingen tussen metingen en theorie.

Voor dit soort testen van het standaardmodel is het heliumatoom bij uitstek geschikt omdat het twee cruciale eigenschappen bezit. Ten eerste is het een relatief eenvoudig atoom, bestaande uit een kern met slechts twee elektronen. Hierdoor kunnen theoretici uiterst nauwkeurige berekeningen doen aan de atomaire energiestructuur, die beschreven wordt door de quantumelektrodynamica. Ten tweede heeft helium enkele aangeslagen toestanden met een veel langere levensduur dan die van de meeste atomaire energieniveaus. Volgens het onzekerheidsprincipe van Heisenberg is zo'n lange levensduur noodzakelijk om de energie van deze niveaus nauwkeurig te kunnen meten.

Zulke metingen maken gebruik van laserspectroscopie, het heel precies bepalen van de frequentie waarbij het atoom fotonen absorbeert. Een afwijking van de meting met het theoretische energieverschil kan erop wijzen dat er nieuwe natuurkunde in het spel is. De nauwkeurigheid van de theoretische berekening van de energieniveaus wordt op dit moment echter beperkt doordat kleine verschui-

vingen optreden die afhankelijk zijn van de grootte van de positief geladen kern. Omdat de straal van de kern niet nauwkeurig genoeg bekend is, keren we het verhaal om. Door te bepalen hoe de overgang tussen twee energieniveaus verschilt voor ^3He en ^4He kunnen we het verschil in de kernstraal bepalen tussen de twee isotopen door middel van quantumelektrodynamische berekeningen. Als we dit verschil vervolgens vergelijken met soortgelijke bepalingen op basis van andere overgangen in helium, kunnen we controleren of de onderliggende theorie consistent en compleet is.

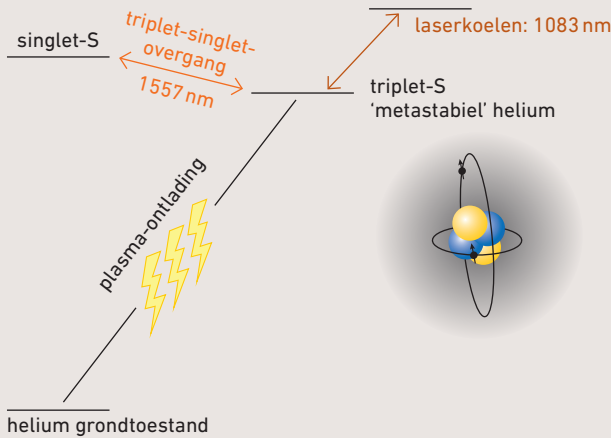
Een 'supercool' experiment

Het is praktisch onmogelijk om zulke kleine invloeden van de kernstraal te meten in een gas van heliumatomen bij kamertemperatuur, omdat het dopplereffect ervoor zorgt dat de rondvliegende atomen allemaal een net iets andere golflengte laserlicht waarnemen. Lijnen in het spectrum verbreden hierdoor zo veel dat moeilijk te zeggen is waar de échte overgang ligt. Zelfs in vloeibaar helium – bij temperaturen van een paar kelvin – is deze 'dopplerverbreiding' nog te groot en bovendien kan het contact met de wanden van een reservoir de metingen verstoren. Daarom maken wij gebruik van laserkoeling en vangen we de atomen in magnetische en optische vallen, om ze vervolgens verder af te koelen richting het absolute nulpunt. Hiervoor worden heliumatomen eerst aangeslagen naar de 'metastabiele' triplet-S-toestand (met een levensduur van enkele uren), van waaruit ze infraroodfotonen bij 1083 nm kunnen opnemen en snel weer uitzenden (zie figuur 1). Elke keer dat een atoom zo'n foton uit de laserkoelbundels opneemt,

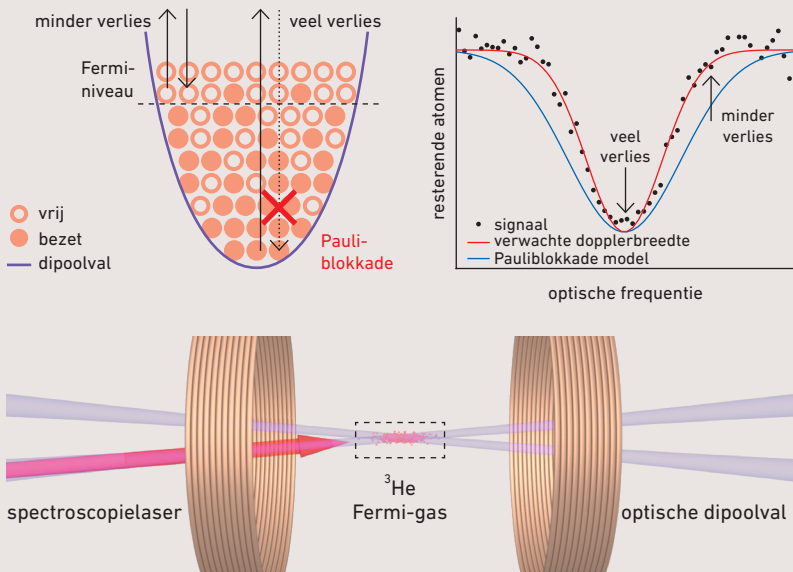
Sectie van een vacuümkamer met heliumatomen gevangen in een magneto-optische val. De spoelen leggen de benodigde magneetvelden aan en de rode laserbundels koelen het gas.



Yuri van der Werf studeerde technische natuurkunde aan de TU/e en doet nu promotieonderzoek in het LaserLaB (VU) naar quantumgassen van metastabiel helium om fundamentele natuurkunde met precisiespectroscopie te testen. Rick Bethlem en Kjeld Eikema (projectleider) begeleiden dit project dat werd opgezet door Wim Vassen (†2019).
y.vander.werf@vu.nl



Figuur 1. Overzicht van de relevante energieniveaus in helium. Via een plasma-ontlading worden de atomen aangeslagen naar de metastabiele triplet-S-toestand. Vanaf hier kunnen ze vervolgens worden gelaserkoeld en geëxciteerd naar de singlet-S-toestand voor de precisiespectroscopie.



Figuur 2. Door het verschijnsel van de Pauliblokkade kunnen atomen in de laagste, grotendeels bezette, energietoestanden niet terugkeren naar het triplet-S-niveau. Hierdoor dragen deze atomen relatief meer bij aan het gemeten signaal en wordt de lijn smaller dan de verwachte dopplerbreedte.

krijgt het een klein duwtje en remt het af. Zo kunnen we in een vacuümkamer met magneetvelden en laserbundels langs drie assen een zogeheten magneto-optische val maken (zie illustratie voorblad). Hier worden de atomen afgekoeld, richting het centrum geduwd en daar vastgehouden. Als we vervolgens één voor één de warmste atomen laten ontsnap-

pen, koelt het resterende gas af tot submicrokelvin-temperaturen. Om spectroscopie te doen aan dit ultrakoude gas, laten we de atomen los in een optische dipoolval. Deze bestaat uit twee gekruiste intense laserbundels. Op het punt waar de twee elkaar snijden ervaren de atomen een minimum in energie en worden ze gevangen. In deze dipoolval worden

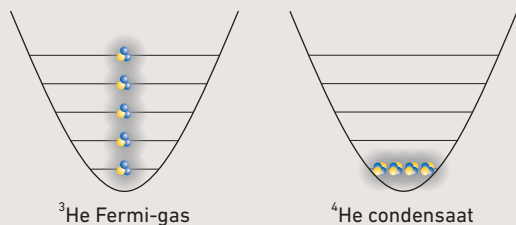
de atomen bij 1557 nm aangeslagen naar de singlet-S-toestand. Door de optische frequentie van het laserlicht nauwkeurig bij te houden, is het mogelijk het energieverval te bepalen. Belangrijk is dat de dipoolval de meting niet mag verstoren. Daarom is deze ontworpen op de zogeheten 'magische' golflengte: hier ervaart zowel de triplet-S- als de singlet-S-toestand exact dezelfde energieverval door de val en vindt er netto geen verschuiving van de overgang plaats.

Eén neutron verschil

Omdat voor de vergelijking met de theorie een meting aan zowel ³He als ⁴He nodig is, krijgen we te maken met een cruciaal verschil tussen de twee isotopen: ⁴He-atomen zijn zogeheten bosonen en vormen samen wanneer ze koud genoeg zijn een Bose-Einsteincondensaat, een materietoestand waarbij alle deeltjes gezamenlijk één grote quantummechanische golf functie bezetten. ³He is daarentegen een fermion, dat zich gedraagt volgens de Fermi-Diracstatistiek. In tegenstelling tot bosonen, kunnen er geen twee fermionen in dezelfde quantumtoestand zitten, het zogeheten Pauli-uitsluitingsprincipe. In een val verdelen de atomen zich dus over de beschikbare quantumtoestanden tot ieder atoom een plekje heeft en het Fermi-niveau is bereikt. Dat betekent dat de atomen aan het Fermi-niveau nog steeds rondbewegen, omdat de toestanden met de laagste kinetische energie al bezet zijn. Een ogenschijnlijk klein verschil van één neutron meer of minder in de kern heeft dus verregaande gevolgen voor het hele experiment en maakt de meetmethode en analyse fundamenteel anders voor de twee isotopen.

Voor ⁴He maken we gebruik van het feit dat bij een botsing van een aangeslagen atoom met het resterende gas de interne energie van de metastabiele toestand vrijkomt en een He⁺-ion produceert. Met een ionendetector kunnen deze ionen met hoge efficiëntie gedetecteerd worden, wat een sterk signaal oplevert. Deze botsingen leiden echter ook tot een verschuiving

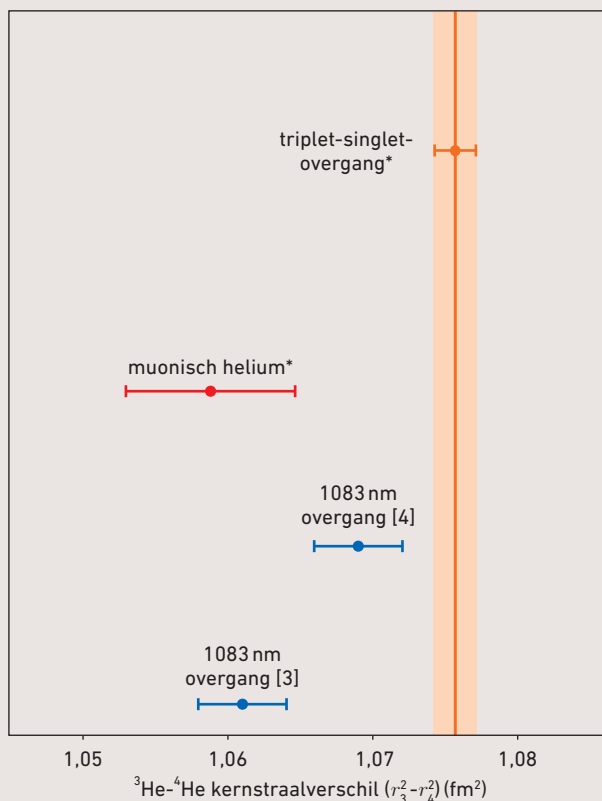
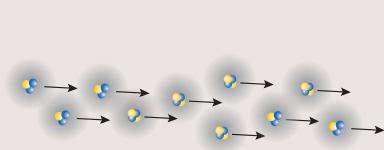
a) triplet-singletovergang: koude quantumgassen



b) muonisch helium: versterking kernstraaleffect



c) 1083 nm laserkoelovergang: atomaire bundel



Figuur 3. Bepalingen van het kernstraalverschil tussen ³He en ⁴He met verschillende methoden. Deze bepalingen vereisen alle een combinatie van uitdagende experimenten met complexe quantumelektrodynamische berekeningen. De vergelijking tussen deze bepalingen omvat daardoor vele aspecten van de moderne quantumfysica. De punten gemarkeerd met een asterisk (*) zijn voorlopige, ongepubliceerde resultaten.

van de overgang waarvoor we moeten corrigeren door bij verschillende gasdichtheden te meten. Dankzij deze analyse hebben we voor het eerst deze verschuiving als gevolg van koude botsingen waargenomen in helium en daarmee nieuwe inzichten verkregen in de botsingsdynamica van deze atomen. Het gemeten energieverschil tussen de toestanden heeft een uiteindelijk nauwkeurigheid van twaalf decimalen, wat een recordprecisie is voor het heliumatoom [1].

Pauliblokkade

De meting in ³He ziet er, vanwege de Fermi-Diracstatistiek, heel anders uit: het Pauliprincipe heeft als opmerkelijk gevolg dat twee ultrakoude fermionen elkaar nooit voldoende kunnen naderen voor een botsing. Hierdoor komen bij spectroscopie aan ³He geen ionen vrij en zijn we voor ons signaal

afhankelijk van het verlies van atomen uit de dipoolval, wanneer ze na excitatie vervallen naar de grondtoestand van helium. Bovendien zijn de atomen verdeeld over de beschikbare quantumtoestanden in de val en is er dus nog steeds een dopplerverbreiding, zij het ordes van grootte kleiner dan bij kamertemperatuur. Bij de eerste metingen aan ³He bleek echter dat de spectraallijnen tegen alle verwachting in consistent smaller waren dan de dopplerverbreiding. Dat is handig voor een precieze meting, maar dat geldt alleen als je volledig begrijpt wat er de oorzaak van is en of dit eventuele systematische fouten oplevert. Daarom hebben we lang gezocht naar de verklaring voor deze lijnbreedtes, die bleek te liggen in een nog nooit eerder geobserveerd effect van een Pauliblokkade. Voor ons signaal meten we hoeveel atomen we verlie-

zen uit de triplet-S-toestand, dus als de laser een aangeslagen atoom weer teruggedrijft naar deze toestand, draagt het niet meer bij aan de meting. Voor de atomen rond het Fermi-niveau is dit proces waarschijnlijker, want hier zijn er meer vrije quantumtoestanden. De laagste quantumtoestanden in de val zijn bezet, dus atomen kunnen hier niet terugkeren vanwege Pauli-blokkade. Het gevolg is dat de atomen rond het Fermi-niveau, dus met de hoogste kinetische energie, relatief minder bijdragen aan het spectroscopisch signaal. Hierdoor wordt de dopplerverbreiding door de rondbewegende atomen deels tegengewerkt. Een wiskundig model liet een perfecte overeenstemming zien met de gemeten lijnbreedtes (zie figuur 2). In combinatie met experimentele testen waarbij we het blokkade-effect opheffen, gaf dit de bevestiging dat deze Pauliblok-

Yuri van der Werf wint NTvN-prijsvraag

Ook afgelopen jaar konden promovendi of pas gepromoveerden weer meedoen met de NTvN-prijsvraag. De opdracht was een artikel in te zenden dat hun onderzoek beschrijft voor de lezers van het NTvN en voldoet aan vooraf gestelde criteria zoals de regels voor plaatsing in het NTvN. Een jury van redactieleden koos daaruit de drie beste inzendingen.

Dit jaar waren er maar liefst zeven artikelen om uit te kiezen. En dat waren niet de minste: allemaal waren het zeer leeswaardige stukken die samen heel mooi de breedte van de natuurkunde in Nederland en Vlaanderen lieten zien. Van heel praktisch onderzoek naar betere zonnecellen, omzetting van kooldioxide naar methanol, toekomstige

supergeleidende geheugenelementen en het voorspellen van de impact van zonnestormen op technologische systemen op aarde, tot fundamenteeler onderzoek naar de interne structuur van het proton, gravitondetectie en de grenzen van de quantumfysica.

De inzendingen lagen qua niveau erg dicht bij elkaar. Daarom besloot de jury de focus bij de beoordeling wat sterker te leggen op de toegankelijkheid van het verhaal voor een breed natuurkundig publiek en de stilistische kwaliteit van de ingezonden tekst en kwam tot de volgende uitslag voor de eerste drie prijzen:

1. *De grenzen van de quantumfysica met ultrakoud helium* door Yuri van der Werf, over de experimentele toetsing van de

quantumfysica met ultrakoud helium.
2. *Op weg naar de eerste observatie van het graviton* door Martine Schut, over een experiment om het graviton aan te tonen.

3. *Pas op - een zonnestorm op komst!* door Christine Verbeke, over de modellering van zonnestormen.

De jury heeft genoten van alle inzendingen en bedankt alle zeven deelnemers hartelijk, met speciale felicitaties voor de drie winnaars.

De prijzen zullen worden uitgereikt tijdens FYSICA 2023 op vrijdag 26 mei in Delft.

De jury,

Tom Beumer, Hans Muller en Wim Verkley

kade inderdaad optreedt. Deze observaties [2] illustreren hoe preciespectroscopie soms onverwachte nieuwe inzichten kan opleveren.

Tot de kern komen

Met een volledig begrip van de aard van het signaal kon de meetcampagne starten om statistiek te verzamelen en de invloed van overige systematische effecten te analyseren ter correctie. Na vier maanden van metingen kennen we nu de triplet-singletovergang in ^3He tot op twaalf decimalen nauwkeurig, net als die van ^4He . Hiermee kunnen we de waarde bepalen van de isotoopverschuiving tussen ^3He en ^4He om daaruit het kernstraalverschil van de atoomkernen te berekenen. Vergelijking met andere metingen leert ons iets over de onderliggende theorie. Twee eerdere bepalingen van het kernstraalverschil [3,4], gebaseerd op de isotoopverschuiving van de overgang bij 1083 nm in het infrarood, maken gebruik van een compleet andere methode waarbij het verschil tussen bosonen en fermionen geen rol speelt. Het kernstraalverschil uit deze metingen is iets kleiner dan dat wat

wij hebben gevonden, maar onderling komen de twee eerdere resultaten ook niet volledig overeen (zie figuur 3). Een ander interessant experiment is er recent in geslaagd om de kernstralen direct te meten, door een muon (een van de zwaardere tegenhangers van het elektron in het standaardmodel) aan een heliumkern te binden en vervolgens een overgang in dit muonisch heliumion te meten. Omdat muonen tweehonderd keer zwaarder zijn dan elektronen, beschrijven ze een veel kleinere baan rond de kern en zijn de energieniveaus van het muonisch heliumion honderdmiljoen keer gevoeliger voor de kernstraal. Ondanks de experimentele en theoretische uitdagingen zijn deze onderzoekers erin geslaagd om zeer nauwkeurig de kernstraal van ^4He [5] en een voorlopige waarde voor ^3He [6] te bepalen, resulterend in een iets kleinere waarde voor het kernstraalverschil dan de onze. Deze vergelijking van normaal en muonisch helium is niet alleen gevoelig voor quantumelektrodynamica, maar kan ook informatie geven over de relatie tussen elektronen en muonen in het standaardmodel.

Conclusie

Het is nu nog te vroeg om uit de afwijkende resultaten in figuur 3 te concluderen dat er daadwerkelijk nieuwe fysica in het spel is. De theorie en de experimenten zijn beide complex en vereisen nadere verificatie door verbeterde metingen en berekeningen. In deze jacht op hogere nauwkeurigheid aan de grenzen van de natuurkunde kunnen zowel het einddoel als de weg er naartoe tot verrassende nieuwe inzichten leiden.

REFERENTIES

1. R. J. Rengelink, Y. van der Werf, R.P.M J.W. Notermans et al., Precision spectroscopy of helium in a magic wavelength optical dipole trap, *Nature Physics* **14**, 1132 - 1137 (2018).
2. R. Jannin, Y. van der Werf, K. Steinebach et al., Pauli blocking of stimulated emission in a degenerate Fermi gas, *Nature Communications* **13**, 6479 (2022).
3. D. Shiner et al., Three-Nucleon Charge Radius: A Precise Laser Determination Using ^3He , *Physical Review Letters* **74**, 3553 - 3556 (1995).
4. P. Cancio Pastor et al., Frequency Metrology of Helium around 1083 nm and Determination of the Nuclear Charge Radius, *Physical Review Letters* **108**, 143001 (2012).
5. Julian J. Krauth et al., Measuring the α -particle charge radius with muonic helium-4 ions, *Nature* **589**, 527 - 531 (2021).
6. Julian J. Krauth, The Lamb shift of the muonic helium-3 ion and the helion charge radius, proefschrift, Ludwig Maximilians Universität München (2017). Voorlopige, ongepubliceerde resultaten.