

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:

<http://hdl.handle.net/1887/59506>

**Author:** Eerkens, H.J.

**Title:** Investigations of radiation pressure : optical side-band cooling of a trampoline resonator and the effect of superconductivity on the Casimir force

**Issue Date:** 2017-12-21

## Samenvatting

Dit proefschrift bevat twee verschillende onderwerpen, die verbonden worden door het begrip stralingsdruk. Stralingsdruk ontstaat wanneer (electromagnetische) straling tegen een object botst en daarbij van richting verandert of wordt geabsorbeerd. Het verschil in impuls wordt overgedragen op het voorwerp dat hierdoor een kracht ondervindt. Deze kracht is in het algemeen erg klein, waardoor het effect alleen merkbaar is als er veel straling is, als het voorwerp erg klein is, of als het voorwerp goed geïsoleerd is van andere invloeden. Een bekend voorbeeld van stralingsdruk is de staart van een komeet. Die beweegt niet achter de komeet aan, zoals in eerste instantie verwacht, maar wijst altijd van de zon af door de stralingsdruk die het licht van de zon levert op het gas dat de staart van de komeet vormt. In het lab kan stralingsdruk ook gemeten worden, of zelfs worden gebruikt om de beweging van mechanische resonatoren te beïnvloeden. Als de resonator klein genoeg is, kan deze significant worden afgeremd of juist aangedreven. Deze interactie wordt onderzocht in het eerste deel van dit proefschrift. Dat straling in zijn vacuümtoestand ook druk kan uitoefenen wordt aangetoond door het Casimireffect. Dit effect wordt bestudeerd in het tweede deel van dit proefschrift. Specifiek richten we ons op de invloed van supergeleidende materialen op de sterkte van de Casimirkracht.

### Optomechanica

In het vakgebied optomechanica wordt gebruikt gemaakt van stralingsdruk veroorzaakt door de reflectie van licht om de beweging van een microscopische resonator te beïnvloeden. Deze koppeling biedt de mogelijkheid om de kwantummechanische eigenschappen van het licht over te brengen op de resonator. Hierdoor zou het in de toekomst mogelijk kunnen worden om de kwantummechanische eigenschappen van relatief grote objecten te onderzoeken.

De grootte van de resonator kan sterk verschillen, net als de frequentie van het gebruikte licht. In ons systeem gebruiken we een spiegeltje met een diameter van  $80\ \mu\text{m}$  dat via vier silicium nitride armpjes verbonden is met de buitenwereld. De beweging van de spiegel valt te vergelijken met dat van een trampoline, vandaar dat we spreken van een trampolineresonator. De spiegel weerkaatst infrarood laserlicht met een golflengte van  $1064\ \text{nm}$ . Om de interactie te versterken plaatsen we een tweede, vaste spiegel tegenover de trampolineresonator. De intensiteit van laserlicht

gevat in deze optische trillholte is vele malen sterker dan de intensiteit van het licht buiten de trillholte. Door de frequentie van het inkomende laserlicht te ontstemmen ten opzichte van de resonantiefrequentie van de trillholte, is het mogelijk de resonator af te remmen of aan te drijven. Omdat het laserlicht erg weinig ruis heeft, kan je er een lage effectieve temperatuur aan toekennen. Koppeling van de trampoline resonator met dit bad resulteert in een verminderde ruis in de beweging van de resonator en daarmee een lagere effectieve temperatuur, waardoor we het niet alleen kunnen afremmen maar ook kunnen koelen. Het mechanisme dat we hiervoor gebruiken heet optisch zijbandkoelen. Hoofdstuk twee van dit proefschrift toont aan hoe dit mechanisme werkt en hoe wij dit toepassen in onze opstelling.

We gebruiken de optomechanische interactie ook om de resonator aan te drijven. In hoofdstuk drie laten we zien dat de amplitude zo'n 450 keer vergroot kan worden ten opzichte van de thermische beweging op kamertemperatuur. Het systeem laat zich goed beschrijven door de gekoppelde bewegingsvergelijkingen van de mechanische spiegel en de optische trillholte. Dit toont de ongevoeligheid van ons systeem voor absorptie van licht.

Het optisch zijbandkoelen van de spiegel is gelimiteerd door mechanische trillingen die ruis in het spectrum veroorzaken, zodanig dat de beweging van de spiegel bij zekere koefactor niet meer waarneembaar is. Om de trampolineresonator te isoleren van deze trillingen, hebben we hem omringd met een tweede trampolineresonator, zodat een genestelde resonator ontstaat. De isolatie van de buitenresonator wordt geschat op zo'n 80 dB. Met deze constructie zijn we in staat om een effectieve temperatuur van 23 mK te bereiken vanaf kamertemperatuur. De beweging van de buitenresonator beïnvloedt echter ook de stabiliteit van de optische trillholte, wat weer een nadelig effect heeft op de mogelijkheid om optisch te koelen. Het is dus belangrijk de beweging van de buitenresonator te dempen. Dit kan met behulp van een fiberoptische interferometer om de beweging uit te lezen en terugkoppeling op basis van ofwel de elektrostatische ofwel de diëlectrische kracht. Beide mogelijkheden worden onderzocht in hoofdstuk vier.

## Casimireffect

Het vacuüm is niet leeg en bevat nog altijd electromagnetische straling. Hierdoor kunnen voorwerpen in vacuüm toch stralingsdruk ondervinden. Dit wordt aangetoond door het Casimireffect, de kracht die twee ongeladen voorwerpen in elkaars nabijheid ondervinden. Deze kracht is over het algemeen heel zwak en wordt alleen significant als de twee voorwerpen dicht bij elkaar staan, op een afstand van niet meer dan een paar micrometer. De sterkte van de kracht hangt verder af van de hoeveelheid reflectie of absorptie die de electromagnetische straling ondervindt aan het oppervlak van de voorwerpen en is dus materiaalafhankelijk. De reflectie en absorptie van een materiaal worden bepaald door zijn diëlectrische permittiviteit. Die kan gemeten worden, maar alleen voor bepaalde frequenties binnen het electromagnetische spectrum, afhankelijk van de beschikbaarheid van stralingsbronnen en detectoren. Het bereik van frequenties die bijdragen aan de kracht is echter heel groot. In principe zijn dit alle frequenties tot een zekere afsnijdfrequentie, die geen bijdrage meer levert omdat de bijbehorende golflengte kleiner is dan de atomen van

het materiaal. In veel gevallen is het bereik van frequenties die bijdragen aan de Casimirkracht dus groter dan het bereik van frequenties waarbij de diëlectrische permittiviteit bekend is. Om toch een berekening van de kracht te kunnen maken, wordt de gemeten diëlectrische permittiviteit geëxtrapoleerd met behulp van modellen. Twee modellen zijn in omloop en discussie bestaat welke het beste gebruikt kan worden. Het grote verschil is de invloed van de weerstand van de vrije elektronen in het materiaal. Het Drudemodel zegt dat dit mee moet worden genomen in het bepalen van de reflectiviteit en daarmee de Casimirkracht, terwijl het volgens het plasmamodel juist weggelaten moet worden. Voor veel materialen waartussen in het verleden de kracht is gemeten leiden de modellen tot een minimaal verschil in de kracht en zijn precisieingen met zeer betrouwbare kalibratie noodzakelijk.

Om dit laatste punt wat te versoepelen is voorgesteld om de Casimirkracht te meten tussen supergeleidende materialen. Van deze materialen is bekend dat de weerstand van de vrije elektronen wegvalt. Een verschil in de kracht boven en onder de kritische temperatuur van de supergeleider zal er dus op duiden dat het Drudemodel de voorkeur heeft, een afwezigheid van dit verschil duidt op het plasmamodel. Een absolute meting van de kracht is dus niet zeer noodzakelijk, zolang aangenomen kan worden dat er verder niets in het systeem verandert met temperatuur. In hoofdstuk vijf van dit proefschrift wordt de Casimirkracht tussen supergeleidende materialen berekend.

Hoewel berekeningen vaak uitgaan van twee parallele platen in elkaars nabijheid, is het perfect parallel uitlijnen van twee platen op een afstand van ongeveer een micrometer experimenteel uitdagend. Net als veel opstellingen gebruiken wij daarom een bol-plaatgeometrie, waarbij een polystyreen bol met een straal van  $100\ \mu\text{m}$  boven een vlakke plaat wordt gepositioneerd. Zowel bol als plaat zijn voorzien van een laag van 200 nm van het gewenste materiaal. In dit proefschrift is de bol bedekt met een goudlaag, terwijl de plaat ofwel een goudlaag ofwel een niobium-titaan-nitridelaag heeft. De metingen tussen twee goudlagen worden gebruikt ter kalibratie en demonstratie van onze opstelling en meetmethode. Wij gebruiken de supergeleider niobium-titaan-nitride vanwege zijn hoge kritische temperatuur en zijn ongevoeligheid voor oxidatie.

De bol zit vast aan een microscopische hefboom, zoals gebruikt in atoomkracht-microscopie. Een kracht op de bol leidt tot een uitwijking van de hefboom, wat wordt uitgelezen via fiberinterferometrie. De techniek achter fiberinterferometrie wordt beschreven in hoofdstuk zes van dit proefschrift, net als enkele andere experimentele details. Het meten van de Casimirkracht heeft nogal wat voeten in de aarde. De grootste uitdaging is de accurate kalibratie van de afstand tussen de twee oppervlakken en van de krachtsensor die gebruikt wordt. Bovendien wordt de Casimirkracht vaak overschaduwed door de elektrostatiche kracht, die ontstaat door een verschil in uittreedpotentiala tussen de twee oppervlakten. Het is dus noodzakelijk om voor deze kracht te compenseren, maar het kan ook gebruikt worden om de opstelling te kalibreren. In tegenstelling tot de Casimirkracht is de elektrostatiche kracht afhankelijk van de spanning tussen de bol en de plaat. Door die spanning te moduleren op een bepaalde frequentie, kunnen we de beide krachten onderscheiden en de bekende elektrostatiche kracht gebruiken voor kalibratie van de krachtsensor en de afstand. Het verschil in uittreedpotentiala kan op deze manier ook worden

gecompenseerd. Het voordeel van onze meetmethode is dat de kalibratie tegelijk geschiedt met de Casimirkrachtmeting, waardoor we minder gevoelig zijn voor veranderingen in de kalibratie over tijd. In hoofdstuk zeven van dit proefschrift laten we zien hoe onze kalibratiemethode werkt en dat we daarmee succesvol de Casimirkracht tussen twee gouden oppervlakten kunnen meten.

De Casimirkrachtmetingen tussen goud en niobium-titaan-nitride staan beschreven in hoofdstuk acht. Hier vinden we op kamertemperatuur dat de hoge weerstand van dit materiaal leidt tot een groot verschil tussen het Drude- en plasmamodel. Accurate metingen van de Casimirkracht lijken aan te tonen dat het gebruik van het Drudemodel meer overeenkomt dan het plasmamodel. Op lage temperatuur is de Casimirkracht significant sterker dan we verwachten op basis van optische reflectiemetingen. Dit lijkt geen effect te zijn van de supergeleidende toestand aangezien deze toename ook te zien is op enkele Kelvin boven de kritische temperatuur van de supergeleider. We kunnen niet uitsluiten dat het effect een technische oorsprong heeft. Rond de supergeleidende overgang van niobium-titaan-nitride zien we geen verschil in de Casimirkracht. Dit zou kunnen duiden op een betere overeenkomst met het plasmamodel, maar gezien de onverklaarde toename van de kracht bij lage temperatuur zijn we voorzichtig deze conclusie te trekken.

Vooralsnog is de gevoeligheid van de metingen gelimiteerd tot eenzelfde orde van grootte als het maximale verwachte effect van de supergeleidende overgang. Om de gevoeligheid te vergroten wordt in hoofdstuk negen de mogelijkheid onderzocht om een optomechanische trilholte, zoals beschreven in het eerste deel van dit proefschrift, te gebruiken als krachtsensor. De gevoeligheid zal hiermee vele malen kunnen toenemen.