



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

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

Eerkens, H.J.

### **Citation**

Eerkens, H. J. (2017, December 21). *Investigations of radiation pressure : optical side-band cooling of a trampoline resonator and the effect of superconductivity on the Casimir force*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/59506>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/59506>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

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

## Casimir force in terms of reflection coefficients

In this appendix we will show the calculations to rewrite the Lifshitz expression for the Casimir force in terms of the reflection coefficients of the plates [110]. The reflection coefficients are expressed in terms of the Fresnel equations. The calculations and expressions are partially based on Ref. [98]. We start with the original expression found by Lifshitz (Equation 5.10 of this thesis and Equation 5.2 of Ref. [97]):

$$F_C = \frac{k_B T}{\pi c^3} \sum_{n=0}^{\infty} \int_1^{\infty} p^2 \xi_n^3 \left\{ \left[ \frac{(s_1 + p)(s_2 + p)}{(s_1 - p)(s_2 - p)} e^{2p\xi_n d/c} - 1 \right]^{-1} + \left[ \frac{(s_1 + \varepsilon_1 p)(s_2 + \varepsilon_2 p)}{(s_1 - \varepsilon_1 p)(s_2 - \varepsilon_2 p)} e^{2p\xi_n d/c} - 1 \right]^{-1} \right\} dp, \quad (\text{A.1})$$

where  $T$  is the temperature,  $d$  the distance between the plates and  $k_B$  and  $c$  Boltzmann's constant and the speed of light respectively. The prime on the summation mark indicates that the term with  $n = 0$  is multiplied by  $\frac{1}{2}$ . For imaginary frequencies  $\omega = i\xi_n = i\frac{2k_B T}{\hbar}n$ ,

$$p = \sqrt{1 + \frac{c^2}{\xi_n^2} k_{\parallel}^2}, \quad (\text{A.2})$$

$$s_{1,2} = \sqrt{\varepsilon_{1,2}(i\xi_n) - 1 + p^2} = \sqrt{\varepsilon_{1,2}(i\xi_n) + \frac{c^2}{\xi_n^2} k_{\parallel}^2}, \quad (\text{A.3})$$

with  $k_{\parallel}$  the wave vector component tangential to the plates. If we multiply the numerators and denominators in Equation A.1 by  $\xi_n^2/c^2$  and write out the expressions

of  $p$  and  $s_{1,2}$ , we find for the fractions

$$\frac{s_{1,2} + p}{s_{1,2} - p} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{1,2} \frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2} + \sqrt{\frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2}}{\sqrt{\varepsilon_{1,2} \frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2} - \sqrt{\frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2}}, \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{s_{1,2} + \varepsilon_{1,2} p}{s_{1,2} - \varepsilon_{1,2} p} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{1,2} \frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2} + \varepsilon_{1,2} \sqrt{\frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2}}{\sqrt{\varepsilon_{1,2} \frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2} - \varepsilon_{1,2} \sqrt{\frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2}}, \quad (\text{A.5})$$

where  $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{1,2}(i\xi_n)$ . We can simplify these expressions if we introduce  $q_n = \sqrt{\frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2}$  and  $k_n^{(1,2)} = \sqrt{\varepsilon_{1,2} \frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2}$ :

$$\frac{s_{1,2} + p}{s_{1,2} - p} = \frac{k_n^{(1,2)} + q_n}{k_n^{(1,2)} - q_n} \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{s_{1,2} + \varepsilon_{1,2} p}{s_{1,2} - \varepsilon_{1,2} p} = \frac{k_n^{(1,2)} + \varepsilon_{1,2} q_n}{k_n^{(1,2)} - \varepsilon_{1,2} q_n}. \quad (\text{A.7})$$

When we apply the expressions above and use  $p dp = \frac{c^2}{\xi_n^2} k_{\parallel} dk_{\parallel}$ , Equation A.1 looks like

$$F_C = \frac{k_B T}{\pi c^3} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} \sqrt{1 + \frac{c^2}{\xi_n^2} k_{\parallel}^2} \xi_n^3 \left\{ \left[ \frac{k_n^{(1)} + q_n k_n^{(2)} + q_n}{k_n^{(1)} - q_n k_n^{(2)} - q_n} e^{2\sqrt{\frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2} d} - 1 \right]^{-1} + \left[ \frac{k_n^{(1)} + \varepsilon_{1,2} q_n k_n^{(2)} + \varepsilon_{2,2} q_n}{k_n^{(1)} - \varepsilon_{1,2} q_n k_n^{(2)} - \varepsilon_{2,2} q_n} e^{2\sqrt{\frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2} d} - 1 \right]^{-1} \right\} \frac{c^2}{\xi_n^2} k_{\parallel} dk_{\parallel}. \quad (\text{A.8})$$

For any further simplification we turn to the Fresnel equations for the reflection coefficients for the transverse electric and transverse magnetic waves [189], where  $\theta_0$  is the angle of incidence for a wave in vacuum reflecting on a medium with dielectric permittivity  $\varepsilon$ :

$$r_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta_0 - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_0}}{\cos \theta_0 + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_0}},$$

$$r_{\text{TM}} = \frac{\varepsilon \cos \theta_0 - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_0}}{\varepsilon \cos \theta_0 + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_0}}. \quad (\text{A.9})$$

For an electromagnetic wave in vacuum  $\sin \theta_0 = k_{\parallel} c / \omega$ , such that  $\cos^2 \theta_0 = 1 - k_{\parallel}^2 c^2 / \omega^2$ . By setting  $\omega = i\xi_n$  and multiplying by  $\xi_n / c$ , we arrive at  $\frac{\xi_n}{c} \cos \theta_0 =$

$\sqrt{\frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2} = q_n$  and  $\frac{\xi_n}{c} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_0} = \sqrt{\varepsilon \frac{\xi_n^2}{c^2} + k_{\parallel}^2} = k_n$ . This means we can write

$$r_{\text{TE}}^{(1,2)} = \frac{q_n - k_n^{(1,2)}}{q_n + k_n^{(1,2)}}, \quad (\text{A.10})$$

$$r_{\text{TM}}^{(1,2)} = \frac{\varepsilon_{1,2} q_n - k_n^{(1,2)}}{\varepsilon_{1,2} q_n + k_n^{(1,2)}}. \quad (\text{A.11})$$

If we compare this with the fractions in Equation A.8, we see that we can replace them directly with the inverted reflection coefficients<sup>1</sup>. After some final transformations, we arrive at the expression for the Casimir force in terms of the reflection coefficients:

$$F_C = \frac{k_B T}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} q_n k_{\parallel} \left\{ \left[ \left( r_{\text{TE}}^{(1)} r_{\text{TE}}^{(2)} \right)^{-1} e^{2q_n d} - 1 \right]^{-1} + \left[ \left( r_{\text{TM}}^{(1)} r_{\text{TM}}^{(2)} \right)^{-1} e^{2q_n d} - 1 \right]^{-1} \right\} dk_{\parallel}. \quad (\text{A.12})$$

---

<sup>1</sup>Actually, the fractions are inversely proportional to  $-r_{\text{TE,TM}}$ , but since the reflection coefficient of medium 1 is multiplied by the reflection coefficient of medium 2, the minus signs cancel out.



## Bibliography

- [1] J. Kepler, *De cometis libelli tres* (Andreas Pergeri, 1619).
- [2] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Clarendon Press, Oxford, 1873).
- [3] P. Lebedev, *Ann. Phys. (Berlin)* **311**, 433 (1901).
- [4] E. F. Nichols and G. F. Hull, *Phys. Rev.* **13**, 307 (1901).
- [5] V. B. Braginsky, A. B. Manukin, and M. Y. Tikhonov, *JETP* **31**, 829 (1970).
- [6] A. Dorsel, J. McCullen, P. Meystre, E. Vignes, and H. Walther, *Phys. Rev. Lett.* **51**, 1550 (1983).
- [7] P.-F. Cohadon, A. Heidmann, and M. Pinard, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3174 (1999).
- [8] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R. X. Adhikari, et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [9] V. M. Mostepanenko and I. Y. Sokolov, *Phys. Lett. A* **125**, 405 (1987).
- [10] E. Fischbach, D. E. Krause, V. M. Mostepanenko, and M. Novello, *Phys. Rev. D* **64**, 075010 (2001).
- [11] R. S. Decca, D. López, E. Fischbach, G. L. Klimchitskaya, D. E. Krause, and V. M. Mostepanenko, *Phys. Rev. D* **75**, 077101 (2007).
- [12] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* **23**, 807 (1935).
- [13] S. Bose, K. Jacobs, and P. L. Knight, *Phys. Rev. A* **56**, 4175 (1997).
- [14] S. Bose, K. Jacobs, and P. L. Knight, *Phys. Rev. A* **59**, 3204 (1999).

- [15] W. H. Zurek, *Phys. Today* **44**, 36 (1991).
- [16] G. C. Ghirardi, A. Rimini, and T. Weber, *Phys. Rev. D* **34**, 470 (1986).
- [17] L. Diósi, *Phys. Rev. A* **40**, 1165 (1989).
- [18] R. Penrose, *Gen. Rel. Gravit.* **28**, 581 (1996).
- [19] I. Pikovski, M. R. Vanner, M. Aspelmeyer, M. Kim, and Č. Brukner, *Nature Physics* **8**, 393 (2012).
- [20] M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maître, A. Maali, C. Wunderlich, J. M. Raimond, and S. Haroche, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4887 (1996).
- [21] W. Marshall, C. Simon, R. Penrose, and D. Bouwmeester, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 130401 (2003).
- [22] D. Kleckner, I. Pikovski, E. Jeffrey, L. Ament, E. Eliel, J. van den Brink, and D. Bouwmeester, *New J. Phys.* **10**, 095020 (2008).
- [23] B. Pepper, R. Ghobadi, E. Jeffrey, C. Simon, and D. Bouwmeester, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 023601 (2012).
- [24] M. Arndt and K. Hornberger, *Nature Physics* **10**, 271 (2014).
- [25] M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg, and F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1391 (2014).
- [26] A. D. O'Connell, M. Hofheinz, M. Ansmann, R. C. Bialczak, M. Lenander, E. Lucero, M. Neeley, D. Sank, H. Wang, M. Weides, et al., *Nature* **464**, 697 (2010).
- [27] J. Chan, T. M. Alegre, A. H. Safavi-Naeini, J. T. Hill, A. Krause, S. Gröblacher, M. Aspelmeyer, and O. Painter, *Nature* **478**, 89 (2011).
- [28] J. Teufel, T. Donner, D. Li, J. Harlow, M. Allman, K. Cicak, A. Sirois, J. Whittaker, K. Lehnert, and R. Simmonds, *Nature* **475**, 359 (2011).
- [29] R. W. Peterson, T. P. Purdy, N. S. Kampel, R. W. Andrews, P.-L. Yu, K. W. Lehnert, and C. A. Regal, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 063601 (2016).
- [30] A. Noguchi, R. Yamazaki, M. Ataka, H. Fujita, Y. Tabuchi, T. Ishikawa, K. Usami, and Y. Nakamura, *New J. Phys.* **18**, 103036 (2016).
- [31] S. Weis, R. Rivière, S. Deléglise, E. Gavartin, O. Arcizet, A. Schliesser, and T. J. Kippenberg, *Science* **330**, 1520 (2010).
- [32] A. H. Safavi-Naeini, T. M. Alegre, J. Chan, M. Eichenfield, M. Winger, Q. Lin, J. T. Hill, D. E. Chang, and O. Painter, *Nature* **472**, 69 (2011).
- [33] F. M. Buters, F. Luna, M. J. Weaver, H. J. Eerkens, K. Heeck, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Opt. Express* (submitted).



- 
- [34] S. Gröblacher, K. Hammerer, M. R. Vanner, and M. Aspelmeyer, *Nature* **460**, 724 (2009).
- [35] E. Verhagen, S. Deléglise, S. Weis, A. Schliesser, and T. J. Kippenberg, *Nature* **482**, 63 (2012).
- [36] P. W. Milonni, *The Quantum Vacuum: An Introduction to Quantum Electrodynamics* (Academic Press, San Diego, 1993).
- [37] H. B. G. Casimir, *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* **51**, 793 (1948).
- [38] S. J. Minter, K. Wegter-McNelly, and R. Y. Chiao, *Physica E* **42**, 234 (2010).
- [39] J. Q. Quach, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 081104 (2015).
- [40] B. C. Denardo, J. J. Puda, and A. Larraza, *Am. J. Phys* **77**, 1095 (2009).
- [41] E. D'Hoker and P. Sikivie, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1136 (1993).
- [42] D. J. Griffiths and E. Ho, *Am. J. Phys.* **69**, 1173 (2001).
- [43] J. Th. Overbeek and M. J. Sparnaay, *Disc. Faraday Soc.* **18**, 12 (1954).
- [44] M. J. Sparnaay, *Physica* **24**, 751 (1958).
- [45] B. V. Derjaguin and I. I. Abrikosova, *Sov. Phys. JETP* **3**, 819 (1957).
- [46] I. I. Abrikosova and B. V. Derjaguin, *Sov. Phys. JETP* **4**, 2 (1957).
- [47] S. K. Lamoreaux, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 5 (1997).
- [48] J. S. Høye, I. Brevik, J. B. Aarseth, and K. A. Milton, *Phys. Rev. E* **67**, 056116 (2003).
- [49] G. Bimonte, *Phys. Rev. A* **78**, 062101 (2008).
- [50] A. O. Sushkov, W. J. Kim, D. A. R. Dalvit, and S. K. Lamoreaux, *Nature Physics* **7**, 230 (2011).
- [51] J. Laurent, H. Sellier, A. Mosset, S. Huant, and J. Chevrier, *Phys. Rev. B* **85**, 035426 (2012).
- [52] C.-C. Chang, A. A. Banishev, R. Castillo-Garza, G. L. Klimchitskaya, V. M. Mostepanenko, and U. Mohideen, *Phys. Rev. B* **85**, 165443 (2012).
- [53] R. Castillo-Garza and U. Mohideen, *Rev. Sci. Instrum.* **84**, 025110 (2013).
- [54] R. Castillo-Garza, J. Xu, G. L. Klimchitskaya, V. M. Mostepanenko, and U. Mohideen, *Phys. Rev. B* **88**, 075402 (2013).
- [55] G. Bimonte, E. Calloni, G. Esposito, and L. Rosa, *Nucl. Phys. B* **726**, 441 (2005).
- [56] I. Wilson-Rae, N. Nooshi, W. Zwerger, and T. Kippenberg, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 093901 (2007).

- [57] F. Marquardt, J. P. Chen, A. Clerk, and S. Girvin, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 093902 (2007).
- [58] O. Arcizet, P.-F. Cohadon, T. Briant, M. Pinard, and A. Heidmann, *Nature* **444**, 71 (2006).
- [59] A. Schliesser, R. Rivière, G. Anetsberger, O. Arcizet, and T. J. Kippenberg, *Nature Physics* **4**, 415 (2008).
- [60] A. Schliesser, O. Arcizet, R. Riviere, G. Anetsberger, and T. Kippenberg, *Nature Physics* **5**, 509 (2009).
- [61] T. Purdy, R. Peterson, P. Yu, and C. Regal, *New J. Phys.* **14**, 115021 (2012).
- [62] A. H. Safavi-Naeini, J. Chan, J. T. Hill, T. P. M. Alegre, A. Krause, and O. Painter, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 033602 (2012).
- [63] D. Kleckner, B. Pepper, E. Jeffrey, P. Sonin, S. M. Thon, and D. Bouwmeester, *Opt. Express* **19**, 19708 (2011).
- [64] E. D. Black, *Am. J. Phys.* **69**, 79 (2001).
- [65] G. A. Phelps and P. Meystre, *Phys. Rev. A* **83**, 063838 (2011).
- [66] J. M. W. Milatz, J. J. van Zolingen, and B. B. van Iperen, *Physica* **19**, 195 (1953).
- [67] H. Hirakawa, S. Hiramatsu, and Y. Ogawa, *Phys. Lett. A* **63**, 199 (1977).
- [68] A. Hopkins, K. Jacobs, S. Habib, and K. Schwab, *Phys. Rev. B* **68**, 235238 (2003).
- [69] D. Kleckner and D. Bouwmeester, *Nature* **444**, 75 (2006).
- [70] W. B. Case, *Am. J. Phys.* **64**, 215 (1996).
- [71] C. H. Metzger and K. Karrai, *Nature* **432**, 1002 (2004).
- [72] H. J. Eerkens, F. M. Buters, M. J. Weaver, B. Pepper, G. Welker, K. Heeck, P. Sonin, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Opt. Express* **23**, 8014 (2015).
- [73] V. Braginsky, S. Strigin, and S. P. Vyatchanin, *Phys. Lett. A* **287**, 331 (2001).
- [74] T. Carmon, H. Rokhsari, L. Yang, T. J. Kippenberg, and K. J. Vahala, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 223902 (2005).
- [75] F. Marino and F. Marin, *Phys. Rev. E* **87**, 052906 (2013).
- [76] L. Bakemeier, A. Alvermann, and H. Fehske, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 013601 (2015).
- [77] T. Kippenberg, H. Rokhsari, T. Carmon, A. Scherer, and K. Vahala, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 033901 (2005).
- [78] M. Ludwig, B. Kubala, and F. Marquardt, *New J. Phys.* **10**, 095013 (2008).

- 
- [79] F. Marquardt, J. Harris, and S. Girvin, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 103901 (2006).
- [80] F. Buters, H. Eerkens, K. Heeck, M. Weaver, B. Pepper, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Phys. Rev. A* **92**, 013811 (2015).
- [81] F. M. Buters, H. J. Eerkens, K. Heeck, M. J. Weaver, B. Pepper, P. Sonin, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Phys. Scr.* **T165**, 014003 (2015).
- [82] J. Poirson, F. Bretenaker, M. Vallet, and A. Le Floch, *JOSA B* **14**, 2811 (1997).
- [83] M. Ludwig, Ph.D. thesis, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg (2013).
- [84] D. Rugar and P. Grütter, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 699 (1991).
- [85] B. Pepper, Ph.D. thesis, University of California Santa Barbara (2014).
- [86] J. A. Haringx, *Philips Tech. Rev.* **1**, 16 (1947).
- [87] G. M. Harry and the LIGO Scientific Collaboration, *Class. Quantum Grav.* **27**, 084006 (2010).
- [88] E. Serra, A. Borrielli, F. S. Cataliotti, F. Marin, F. Marino, A. Pontin, G. A. Prodi, and M. Bonaldi, *Phys. Rev. A* **86**, 051801 (2012).
- [89] J. Liu, F. A. Torres, Y. Ma, C. Zhao, L. Ju, D. G. Blair, S. Chao, I. Roch-Jeune, R. Flaminio, C. Michel, et al., *Appl. Opt.* **53**, 841 (2014).
- [90] R. A. Norte, Ph.D. thesis, California Institute of Technology (2014).
- [91] M. J. Weaver, B. Pepper, F. Luna, F. M. Buters, H. J. Eerkens, G. Welker, B. Percock, K. Heeck, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 033501 (2016).
- [92] D. Rugar, H. J. Mamin, R. Erlandsson, J. E. Stern, and B. D. Terris, *Rev. Sci. Instrum.* **59**, 2337 (1988).
- [93] Q. P. Unterreithmeier, E. M. Weig, and J. P. Kotthaus, *Nature* **458**, 1001 (2009).
- [94] J. B. Marion and S. T. Thornton, *Classical Dynamics of Particles and Systems* (Harcourt College Publishers, 1995), 4th ed.
- [95] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics* (Prentice Hall, 1999), 3rd ed.
- [96] F. M. Buters, K. Heeck, H. J. Eerkens, M. J. Weaver, F. Luna, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 104104 (2017).
- [97] E. M. Lifshitz, *Soviet Physics* **2**, 73 (1956).
- [98] M. Bordag, G. L. Klimchitskaya, U. Mohideen, and V. M. Mostepanenko, *Advances in the Casimir Effect* (Oxford University Press, 2009).
- [99] J. Schwinger, L. L. DeRaad, and K. A. Milton, *Ann. Phys.* **115**, 1 (1978).

- [100] P. W. Milonni, *Phys. Rev. A* **25**, 1315 (1982).
- [101] R. L. Jaffe, *Phys. Rev. D* **72**, 021301 (2005).
- [102] O. Kenneth, I. Klich, A. Mann, and M. Revzen, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 033001 (2002).
- [103] J. N. Munday, F. Capasso, and V. A. Parsegian, *Nature* **457**, 170 (2009).
- [104] A. D. Phan and N. A. Viet, *Phys. Rev. A* **84**, 062503 (2011).
- [105] S. M. Rytov, *Theory of Electrical Fluctuations and Thermal Radiation* (Academy of Sciences Press, Moscow, 1953).
- [106] M. S. Tomaš, *Phys. Lett. A* **342**, 381 (2005).
- [107] A. A. Banishev, G. L. Klimchitskaya, V. M. Mostepanenko, and U. Mohideen, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 137401 (2013).
- [108] R. Esquivel-Sirvent, C. Villarreal, W. L. Mochán, A. M. Contreras-Reyes, and V. B. Svetovoy, *J. Phys. A* **39**, 6323 (2006).
- [109] G. S. Agarwal, *Phys. Rev. A* **11**, 243 (1975).
- [110] E. I. Kats, *JETP* **46**, 109 (1977).
- [111] I. Pirozhenko, A. Lambrecht, and V. B. Svetovoy, *New J. Phys.* **8**, 238 (2006).
- [112] E. D. Palik, ed., *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic Press Inc., San Diego, 1985).
- [113] S. K. Lamoreaux, *Phys. Rev. A* **59**, R3149 (1999).
- [114] A. Lambrecht and S. Reynaud, *Eur. Phys. J. D* **8**, 309 (2000).
- [115] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics* (Brooks Cole, 1976).
- [116] J. Peatross and M. Ware, *Physics of Light and Optics* (BYU Bookstore, Provo, USA, 2015).
- [117] M. Bordag, B. Geyer, G. L. Klimchitskaya, and V. M. Mostepanenko, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 503 (2000).
- [118] G. L. Klimchitskaya and V. M. Mostepanenko, *Phys. Rev. A* **63**, 062108 (2001).
- [119] V. B. Bezerra, G. L. Klimchitskaya, V. M. Mostepanenko, and C. Romero, *Phys. Rev. A* **69**, 022119 (2004).
- [120] I. Brevik, J. B. Aarseth, J. S. Høyve, and K. A. Milton, *Phys. Rev. E* **71**, 056101 (2005).
- [121] I. Brevik, S. A. Ellingsen, and K. A. Milton, *New J. Phys.* **8**, 236 (2006).
- [122] F. Intravaia and C. Henkel, *J. Phys. A: Math. Theor.* **41**, 164018 (2008).

- 
- [123] F. Intravaia and C. Henkel, Phys. Rev. Lett. **103**, 130405 (2009).
- [124] M. Boström and B. E. Sernelius, Phys. Rev. Lett. **84**, 4757 (2000).
- [125] F. Chen, G. L. Klimchitskaya, U. Mohideen, and V. M. Mostepanenko, Phys. Rev. Lett. **90**, 160404 (2003).
- [126] G. Bimonte, E. Calloni, G. Esposito, L. Milano, and L. Rosa, Phys. Rev. Lett. **94**, 180402 (2005).
- [127] R. Pöpel, J. Appl. Phys. **66**, 5950 (1989).
- [128] C. J. Gorter and H. Casimir, Physica **1**, 306 (1934).
- [129] H. Haakh, Ph.D. thesis, University of Potsdam (2009).
- [130] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **106**, 162 (1957).
- [131] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **108**, 1175 (1957).
- [132] D. C. Mattis and J. Bardeen, Phys. Rev. **111**, 412 (1958).
- [133] A. J. Berlinsky, C. Kallin, G. Rose, and A.-C. Shi, Phys. Rev. B **48**, 4074 (1993).
- [134] G. Bimonte, H. Haakh, C. Henkel, and F. Intravaia, J. Phys. A: Math. Theor. **43**, 145304 (2010).
- [135] G. Bressi, G. Carugno, R. Onofrio, and G. Ruoso, Phys. Rev. Lett. **88**, 041804 (2002).
- [136] B. Derjaguin, Kolloid Z. **69**, 155 (1934).
- [137] J. Blocki, J. Randrup, W. J. Swiatecki, and C. F. Tsang, Ann. Phys. **105**, 427 (1977).
- [138] V. A. Parsegian, *Van der Waals Forces: a handbook for biologists, chemists, engineers, and physicists* (Cambridge University Press, 2006).
- [139] M. Schaden and L. Spruch, Phys. Rev. Lett. **84**, 459 (2000).
- [140] J. R. Gavaler, D. W. Deis, J. K. Hulm, and C. K. Jones, Appl. Phys. Lett. **15**, 329 (1969).
- [141] T. de Jong, Master's thesis, Leiden University (2016).
- [142] U. Mohideen and A. Roy, Phys. Rev. Lett. **81**, 4549 (1998).
- [143] B. W. Harris, F. Chen, and U. Mohideen, Phys. Rev. A **62**, 052109 (2000).
- [144] S. de Man, K. Heeck, R. J. Wijngaarden, and D. Iannuzzi, Phys. Rev. Lett. **103**, 040402 (2009).
- [145] H. B. Chan, V. A. Aksyuk, R. N. Kleiman, D. J. Bishop, and F. Capasso, Science **291**, 1941 (2001).

- [146] R. S. Decca, D. López, E. Fischbach, and D. E. Krause, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 050402 (2003).
- [147] R. S. Decca, D. López, and E. Osquiguil, *Int. J. Mod. Phys. A* **25**, 2223 (2010).
- [148] A. W. Rodriguez, F. Capasso, and S. G. Johnson, *Nature Photonics* **5**, 211 (2011).
- [149] W. A. Ducker, T. J. Senden, and R. M. Pashley, *Nature* **353**, 239 (1991).
- [150] D. Rugar, H. J. Mamin, and P. Guethner, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 2588 (1989).
- [151] A. E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Sausalito, 1986).
- [152] E. Hecht, *Optics* (Addison Wesley, San Francisco, 2002), 4th ed.
- [153] G. Brooker, *Modern Classical Optics* (Oxford University Press, Oxford, 2002).
- [154] S. Yuan and N. A. Riza, *Appl. Opt.* **38**, 3214 (1999).
- [155] M. A. Arain and G. Mueller, *Opt. Express* **17**, 19181 (2009).
- [156] P. J. van Zwol, G. Palasantzas, M. van de Schootbrugge, J. T. M. de Hosson, and V. S. J. Craig, *Langmuir* **24**, 7528 (2008).
- [157] A. A. Maradudin and P. Mazur, *Phys. Rev. B* **22**, 1677 (1980).
- [158] G. L. Klimchitskaya, A. Roy, U. Mohideen, and V. M. Mostepanenko, *Phys. Rev. A* **60**, 3487 (1999).
- [159] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity* (Dover Publications, Mineola, New York, USA, 1996), 2nd ed.
- [160] S. de Man, K. Heeck, and D. Iannuzzi, *Phys. Rev. A* **82**, 062512 (2010).
- [161] T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, and D. Rugar, *J. Appl. Phys.* **69**, 668 (1991).
- [162] M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle, and H. K. Wickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2921 (1991).
- [163] A. Hadjadj, B. Equer, A. Beorchia, and P. Roca Cabarrocas, *Philos. Mag. B* **82**, 1257 (2002).
- [164] C. C. Speake and C. Trenkel, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 160403 (2003).
- [165] R. O. Behunin, F. Intravaia, D. A. R. Dalvit, P. A. Maia Neto, and S. Reynaud, *Phys. Rev. A* **85**, 012504 (2012).
- [166] W. R. Smythe, *Static and Dynamic Electricity* (McGraw-Hill, New York, 1950), 2nd ed.
- [167] T. Hong, K. Choi, K. I. Sim, T. Ha, B. C. Park, H. Yamamori, and J. H. Kim, *J. Appl. Phys.* **114**, 243905 (2013).

- 
- [168] E. van Heumen (UvA), Optical spectroscopy lab, <http://vanheumen.quantummatter.nl/>.
- [169] G. A. Campbell, *Electric wave-filter* (1917), US Patent 1,227,113.
- [170] A. Lambrecht, I. Pirozhenko, L. Duraffoung, and P. Andreucci, *EPL* **77**, 44006 (2007).
- [171] G. Joos and A. Klopfer, *Z. Physik* **138**, 251 (1954).
- [172] K. Ujihara, *J. Appl. Phys.* **43**, 2376 (1972).
- [173] G. Barton, *Rep. Prog. Phys.* **42**, 963 (1979).
- [174] J. F. Annett, *Superconductivity, Superfluids and Condensates* (Oxford University Press, 2004).
- [175] R. S. Decca, D. López, H. B. Chan, E. Fischbach, D. E. Krause, and C. R. Jamell, *Phys. Rev. Lett.* (2005).
- [176] F. Chen, U. Mohideen, G. L. Klimchitskaya, and V. M. Mostepanenko, *Phys. Rev. A* **72**, 020101 (2005).
- [177] H. B. Chan, Y. Bao, J. Zou, R. A. Cirelli, F. Klemens, W. M. Mansfield, and C. S. Pai, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 030401 (2008).
- [178] W. J. Kim, A. O. Sushkov, D. A. R. Dalvit, and S. K. Lamoreaux, *Phys. Rev. Lett.* (2009).
- [179] G. Bimonte, D. Born, E. Calloni, G. Esposito, U. Huebner, E. Il'ichev, L. Rosa, F. Tafuri, and R. Vaglio, *J. Phys. A* **41**, 164023 (2008).
- [180] A. Lambrecht, P. A. M. Neto, and S. Reynaud, *New J. Phys.* **8**, 243 (2006).
- [181] S. J. Rahi, T. Emig, N. Graham, R. L. Jaffe, and M. Kardar, *Phys. Rev. D* **80**, 085021 (2009).
- [182] P. Antonini, G. Bressi, G. Carugno, G. Galeazzi, G. Messineo, and G. Ruoso, *New J. Phys.* **8**, 239 (2006).
- [183] D. Garcia-Sanchez, K. Y. Fong, H. Bhaskaran, S. Lamoreaux, and H. X. Tang, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 027202 (2012).
- [184] D. Garcia-Sanchez, K. Y. Fong, H. Bhaskaran, S. Lamoreaux, and H. X. Tang, *Rev. Sci. Instrum.* **84**, 015115 (2013).
- [185] O. Suchoi and E. Buks, *Europhys. Lett.* **115**, 14001 (2016).
- [186] F. M. Buters, M. J. Weaver, H. J. Eerkens, K. Heeck, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Phys. Rev. A* **94**, 063813 (2016).
- [187] B. S. Sheard, M. B. Gray, C. M. Mow-Lowry, D. E. McClelland, and S. E. Whitcomb, *Phys. Rev. A* **69**, 051801(R) (2004).

- [188] A. Pontin, M. Bonaldi, A. Borrielli, F. S. Cataliotti, F. Marino, G. A. Prodi, E. Serra, and F. Marin, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 023601 (2014).
- [189] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media* (Pergamon Press, Oxford, 1960).



## 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 overschaduwde 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.

## Curriculum Vitae

### Hedwig Julia Eerkens

10 February 1987 born in Diemen, The Netherlands

Sep 1999-Nov 2002 secondary education, **St. Vitus College, Bussum**

Nov 2002-Sep 2005 secondary education, **Vossius Gymnasium, Amsterdam**  
thesis: *"De baan van een boemerang"*

Sep 2005-Sep 2009 bachelor Natuurkunde, **Universiteit Leiden**  
thesis: *"Invloed van de membraandikte op de aggregatie van transmembrane peptiden middels elektron paramagnetische resonantie"*

Sep 2009-Apr 2012 master Research in Experimental Physics, **Universiteit Leiden**  
theses: *"Kelvin Probe Force Microscopy on gold nanoparticle networks"*  
*"Fluctuations and transitions in weakly vibrated granular matter"*

Sep 2012-Jun 2017 PhD research, **Universiteit Leiden**  
Quantum Matter and Optics, promotor Dirk Bouwmeester

from Aug 2017 medical physicist in training, **VU Medical Center, Amsterdam**



## List of Publications

### Publications

1. Brian Pepper, Petro Sonin, **Hedwig Eerkens**, Sven de Man, and Dirk Bouwmeester, *Towards macroscopic superpositions via single-photon optomechanics* (Springer International Publishing, Cham, 2014), pp. 65-85, ISBN 978-3-319-04063-9.
2. **H. J. Eerkens**, F. M. Buters, M. J. Weaver, B. Pepper, G. Welker, K. Heeck, P. Sonin, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Optical side-band cooling of a low frequency optomechanical system*, *Opt. Express*, **23**, 8014 (2015).
3. H. C. Overweg, A. M. J. den Haan, **H. J. Eerkens**, P. F. A. Alkemade, A. L. La Rooij, R. J. C. Spreeuw, L. Bossoni, and T. H. Oosterkamp, *Probing the magnetic moment of FePt micromagnets prepared by focused ion beam milling*, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 072402, (2015).
4. F. M. Buters, **H. J. Eerkens**, K. Heeck, M. J. Weaver, B. Pepper, P. Sonin, S. de Man and D. Bouwmeester, *Large parametric amplification in an optomechanical system*, *Phys. Scr.* **T165**, 014003 (2015).
5. F. M. Buters, **H. J. Eerkens**, K. Heeck, M. J. Weaver, B. Pepper, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Experimental exploration of the optomechanical attractor diagram and its dynamics*, *Phys. Rev. A* **92**, 013811 (2015).
6. F. M. Buters, M. J. Weaver, **H. J. Eerkens**, K. Heeck, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Optomechanics with a polarization nondegenerate cavity*, *Phys. Rev. A* **94**, 063813 (2016).
7. M. J. Weaver, B. Pepper, F. Luna, F. M. Buters, **H. J. Eerkens**, G. Welker, B. Perock, K. Heeck, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Nested trampoline resonators for optomechanics*, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 033501 (2016).
8. F. M. Buters, K. Heeck, **H. J. Eerkens**, M. J. Weaver, F. Luna, S. de Man, and D. Bouwmeester, *High-Q nested resonator in an actively stabilized optomechanical cavity*, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 104104 (2017).

9. F. M. Buters, F. Luna, M. J. Weaver, **H. J. Eerkens**, K. Heeck, S. de Man, and D. Bouwmeester, *Straightforward method to measure optomechanically induced transparency*, *Opt. Express* **25**, 12935 (2017).
10. **H. J. Eerkens**, F. Intraivaia, E. van Heumen, K. Heeck, S. de Man, and D. Bouwmeester, *A better comparison between the Drude and plasma model approaches using the high resistivity metal NbTiN*, to be submitted

### Presentations

1. NNV AMO Lunteren 2014, "*Quest for the quantum ground state*", Lunteren, The Netherlands, contributed talk (7 October 2014).
2. Mechanical Systems in the Quantum Regime (Gordon Research Seminars), "*Exploring Nested Resonators for Optomechanical Cooling*", Ventura, California, USA, contributed talk (6 March 2016).
3. Physics@Veldhoven 2017, "*Experimental Investigation of the Effect of Superconductivity on the Casimir Force*", Veldhoven, The Netherlands, contributed talk (18 January 2017).



## Acknowledgements

Science is hardly ever the result of only one person's effort. Therefore I wish to use this opportunity to thank the people that contributed to this work. I am sure that this list will be far from complete.

First of all I thank my supervisor Dirk Bouwmeester for his insights and the great amount of freedom to conduct this research. In the lab I enjoyed working closely together with Frank Buters, who taught me that patience is not always a virtue. From Sven de Man en Kier Heeck I learned to simplify problems and to clarify my thoughts. I believe this is the most valuable lesson I have learned during my research. I thank Matthew Weaver and Fernando Luna for the good times and useful discussions, both in the Netherlands and in the US. I also thank Petro Sonin, Brian Pepper and Evan Jeffrey for getting me started and showing me the details of the set-ups.

The technical support available at the institute is invaluable. I especially want to thank Harmen van der Meer from the fine mechanics department, his speed in bringing the designs to reality never ceased to amaze. Further thanks to Gert Koning and Fred Schenkel from the fine mechanics department, Arno van Amersfoort, Ko Koning and Peter van Veldhuizen from the electronics department, Wilfred van der Geest from the cryogenics department and our secretary Henriette van Leeuwen. I thank Federica Galli and Marcel Hesselberth for their support with the SEM and AFM. Operating cryostats is a skill on its own, I therefore thank Gesa Welker and Martin de Wit for saving me the effort of having to know all the details. I also thank Tjerk Oosterkamp for letting me use his cryostat for the Casimir force measurements.

I am grateful for the discussions with Wolfgang Loeffler, Martin van Exter and Michiel de Dood. It was always a very calming thought that I could walk into their offices with any question to be advised in the right direction. Francesco Intravaia was always willing to answer my Casimir force related questions and to proofread parts of my thesis, which improved my understanding significantly. I also thank Erik van Heumen for the optical reflection measurements, which proved crucial for our understanding of the Casimir force between NbTiN and gold.

In supervising students I hope to have learned as much as they have. I thank David Kok, Timo Blom and Tobias de Jong for this experience.

I am glad to have been a part of the quantum optics group during the time of my research. I will always have fond memories of our coffee breaks, sailing trips, test

defences and other traditions, and I thank the people from the group for creating those memories.

I realize that during my research I could not be available for my family and friends as much as I had wished. I am grateful for their understanding. Special thanks to my father for showing me the joys of physics from an early age. I thank my sisters for their willingness to be my paranymphs. Finally, I couldn't be more happy with Ron for joining me on the adventure called life.

## Index

- BCS-theory, 61, 66
- Casimir force, 9, 12–14, 49–67, 74, 79, 82–84, 87–101, 103–105
- contact potential difference, 79, 82, 84, 85, 88, 93, 97
- dielectric permittivity, 13, 49–66, 91–97, 100, 101, 103
  - Drude model, 13, 49, 54–66, 90, 92–95, 100, 103
  - Drude-Lorentz model, 55, 56, 63, 65, 92–96, 100, 101
  - Drude-two-fluid model, 60–63, 100
  - generalized plasma model, 55, 56, 63, 65, 93–97
  - plasma model, 13, 49, 55–57, 59–62, 64–66, 90, 92, 95, 100, 101, 103
- effective linewidth, 21, 22, 28, 29, 36
- effective temperature, 11, 21–23, 33–36, 45
- electrostatic force, 13, 14, 38–45, 74, 79, 80, 82–84, 86–90, 95, 104–107
- fiber interferometry, 13, 38, 39, 42, 67–73, 76, 80–83, 86, 104, 106, 107
- FM detection, 83–86, 88, 93, 96, 99, 105, 106
- force sensitivity, 14, 32, 45, 67, 69–73, 80, 86, 97, 101, 103–107
- gravity, 9, 10, 12, 17, 18
- GRIN lens, 67, 73
- Kramers-Kronig relation, 54, 61, 93
- Lifshitz formulation, 13, 49, 51–54, 57, 90
- macroscopic quantum superposition, 9–11, 17, 18, 33
- Matsubara frequencies, 53, 56–59, 63–66, 95, 101
- mechanical vibrations, 11, 19, 31, 33–38, 45, 46, 70–72, 82
  - isolation, 19, 27, 33, 34, 39, 42, 80, 93
- Meissner effect, 50, 61, 66
- nested resonator, 11, 34, 35, 37, 40, 42, 43, 45, 107
  - inner resonator, 33–37, 40
  - outer resonator, 33–40, 43–45, 107
- noise floor (*see* force sensitivity)
- optical cavity, 10, 11, 17–23, 26, 27, 37, 38, 106, 107
  - linewidth, 17–24, 28, 36, 37
- optical cooling, 9, 11, 17–25, 29, 33–36
- optical damping (*see* effective linewidth)
- optical spring effect, 22, 23, 29, 36, 37, 106
- optomechanics, 9–11, 18, 36
- parametric oscillations, 25, 26, 29, 31

- phonon, 18, 19, 23, 29, 33, 46
- proximity force approximation, 64, 82, 87, 88, 93
- QS detection, 83–87, 90, 93, 96, 97, 99
- quantum mechanical ground state, 11, 17, 18, 23, 24, 33, 36
- radiation pressure, 9, 10, 12, 28, 29, 51
- side-band resolved regime, 18, 21, 23, 37
- superconductor, 9, 12–14, 49, 50, 54, 59–67, 76, 90, 91, 97, 98, 100, 101, 103, 104
  - dielectric permittivity, 13, 60, 61, 65, 97
- surface roughness, 67, 74, 75, 90, 106
- trampoline resonator, 11, 18, 20, 27, 33, 34, 45, 106, 107
  - mechanical linewidth, 19–21, 28, 31, 34, 36
- two-fluid model, 60–62, 65, 66, 100
- vacuum fluctuations, 9, 11, 12, 49, 51, 52, 96, 107
- van der Waals interaction, 12, 49
- zero-order mode, 53, 56, 57, 59–61, 64, 66, 95
  - TE mode, 57, 59, 61–64
  - TM mode, 57, 61