



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Magnetic Resonance Force Microscopy and the spin bath : towards single-spin massive-resonator entanglement and the spoiling influence of the spin bath

Voogd, J.M. de

Citation

Voogd, J. M. de. (2018, February 20). *Magnetic Resonance Force Microscopy and the spin bath : towards single-spin massive-resonator entanglement and the spoiling influence of the spin bath*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/61001>

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/1887/61001>

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

Cover Page



Universiteit Leiden

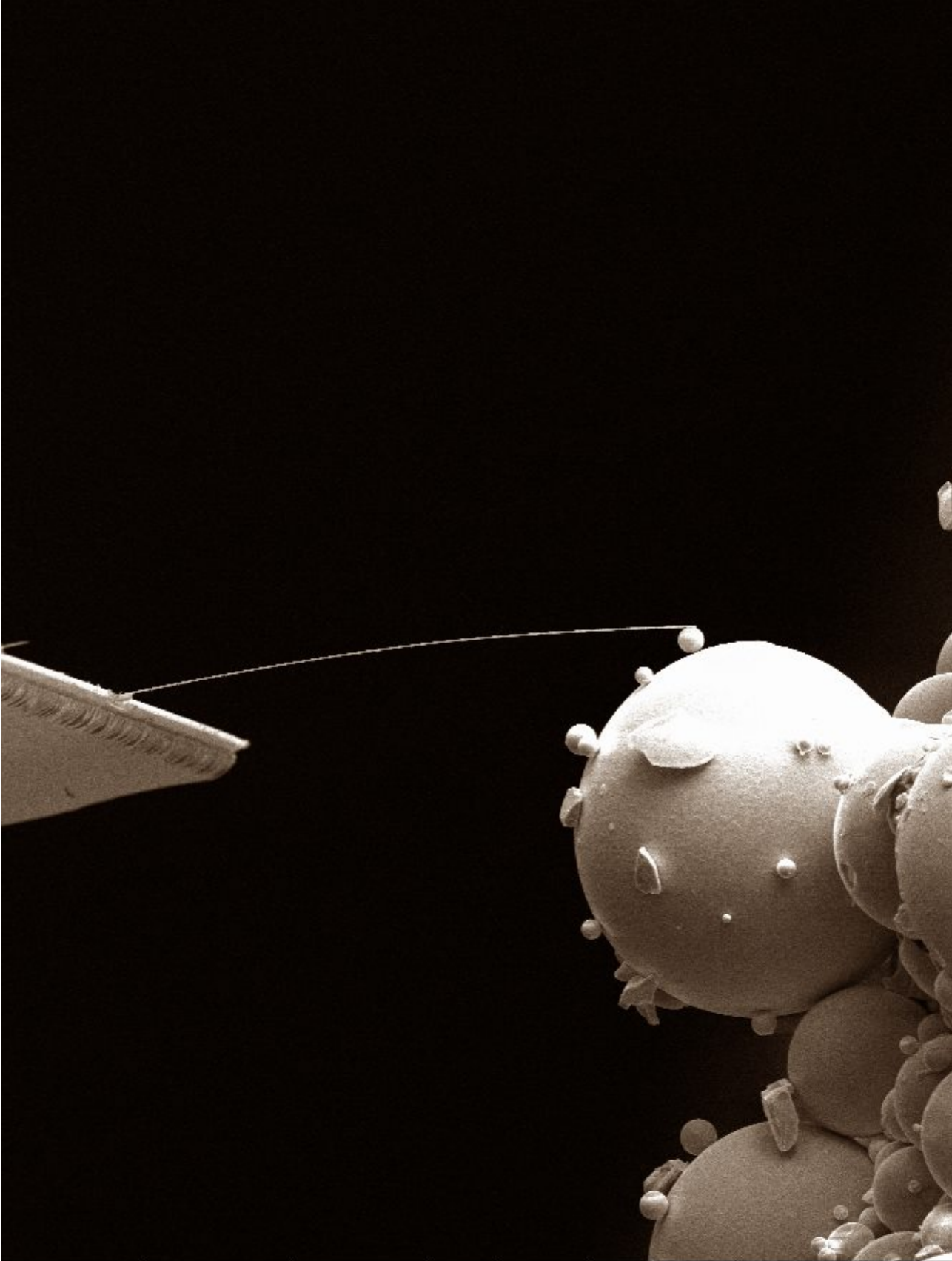


The handle <http://hdl.handle.net/1887/61001> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Voogd, J.M. de

Title: Magnetic Resonance Force Microscopy and the spin bath : towards single-spin massive-resonator entanglement and the spoiling influence of the spin bath

Issue Date: 2018-02-20



WD	HV	mag	tilt	spot	curr	
5.6 mm	15.0 kV	1 000 x	0 °	3.5	0.18 nA	

Samenvatting

De samenvatting is toegankelijk gemaakt voor een breed publiek. Hierom zijn sommige zaken vereenvoudigd en zijn er geen bronvermeldingen opgenomen. De wetenschappelijk geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar de Engelstalige introductie in hoofdstuk 1.

BEGIN TWINTIGSTE EEUW werden er twee vernieuwende natuurkundige theorieën ontwikkeld die het wereldbeeld van de natuurkundige wetenschapper voorgoed veranderden. De ene theorie is Einsteins geometrische beschrijving van de zwaartekracht die de bewegingen van grote objecten nauwkeurig beschrijft. De andere theorie, de kwantummechanica, beschrijft de natuur op heel kleine schaal. Al een eeuw lang wordt geprobeerd deze twee theorieën te verenigen in één natuurkundig model. Dit wordt voornamelijk geprobeerd door de kwantummechanica uit te breiden en Einsteins theorie daar dan weer uit voort te laten komen. Dit is tot op heden niet gelukt.

VOLGENS DE KWANTUMMECHANICA kan een deeltje of object op meerdere plekken tegelijk zijn. Als we de positie van datgene meten, krijgen we echter maar één uitkomst. De kwantummechanica beschrijft wel heel nauwkeurig de kans op die uitkomst, maar niet precies welke uitkomst je daadwerkelijk gaat meten.

Het moet worden benadrukt dat voor de meting het object écht op meerdere plekken tegelijk is. Echter, door een meting te doen begint het object na die meting weer

vanaf een enkele positie. De meting, hoe voorzichtig ook gedaan, beïnvloedt fundamenteel het te bestuderen object. Maar waarom beïnvloedt het observeren van een object de toestand van het object? Dit is het zogeheten meetprobleem.

Er zijn veel verschillende verklaringen bedacht, maar geen van alle is bewezen. Sommige interpretaties kunnen waarschijnlijk niet bewezen worden. Welke van deze interpretaties de juiste is, kan grote gevolgen hebben voor de wetenschap, omdat het onderwerp onder meer direct gelinkt is aan primordiale vraagstukken zoals: Wat betekent kans wanneer je maar over één uniek evenement spreekt?, Is energie misschien toch geen behouden grootheid?, Zijn er andere parallelle werelden?, en Bestaat er eigenlijk wel zoiets als vrije wil?

DE WETENSCHAPPERS Diósi en Penrose lieten met relatief eenvoudige redeneringen zien waar de kwantummechanica botst met Einsteins theorie en gebruikten deze conclusies in het onderbouwen van een nieuwe interpretatie van de kwantummechanica. Dus door het combineren van twee problemen konden Diósi en Penrose aangeven onder welke omstandigheden één of beide natuurkundige modellen niet meer kloppen. Hét grote verschil met andere interpretaties is dat we deze beweringen kunnen testen.

De afgelopen eeuw is er een wildgroei aan oplossingen ontstaan voor één of beide problemen, maar geen van alle is eenvoudig en kloppend genoeg. Wat we nodig hebben, is een test waarvan de uitkomst vele mogelijkheden uitsluit en, als het even kan, aanwijzingen geeft die leiden naar de juiste oplossing. Een dergelijk experiment is wat wij, en vele onderzoeksgroepen met ons, proberen te verwezenlijken.

Experiment

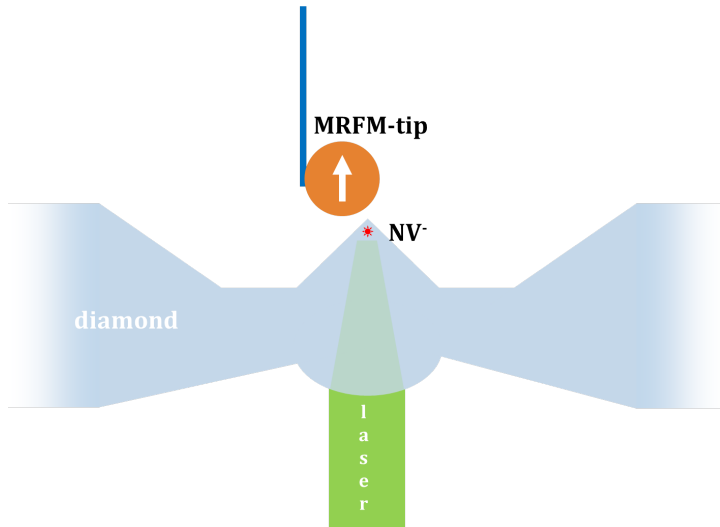
HET PRINCIPE van het experiment is heel eenvoudig: probeer een zo zwaar mogelijk object zo lang mogelijk op meerdere plekken tegelijk te laten zijn. Wij hebben

gekozen om een bestaande techniek te gebruiken en te verbeteren. Deze is de Magnetic Resonance Force Microscope (MRFM). Deze bestaat uit een klein magnetisch balletje dat aan een heel gevoelig veertje (in de vorm van een duikplankje) hangt. De elektronenmicroscopie-foto aan het begin van dit hoofdstuk is gemaakt net nadat wij het balletje van 0.003 mm doorsnede aan het 0.15 mm lange duikplankje hebben geplakt. De MRFM is door dit balletje zeer gevoelig voor magnetische velden, en dat kunnen we goed gebruiken.

Het balletje wordt vervolgens in de buurt van het te bestuderen object gepositioneerd. Sommige atomen zijn kleine magneetjes. Deze atoom-magneetjes, ook wel spins genoemd, kunnen we laten draaien. De MRFM-tip kan vervolgens voelen hoeveel en welke spins er draaien. Uit de trilling van de MRFM-tip kan dan weer het object gereconstrueerd worden. De methode om de hoeveelheid spins op een plek te meten door ze te laten draaien is vergelijkbaar met die van een MRI-scanner zoals die wordt gebruikt in het ziekenhuis.

De MRFM kan worden gebruikt voor zowel materiaalkundig onderzoek als biologisch onderzoek. Het is een unieke techniek omdat het, zonder het te bestuderen object kapot te maken, driedimensionale plaatjes kan maken van zowel eiwitten (waarvan de werking voornamelijk bepaald wordt door de driedimensionale structuur) als nieuwe soorten materialen die hun vele technologische toepassingen nog moeten vinden. De techniek staat echter nog in de kinderschoenen en er is nog veel onderzoek nodig om de MRFM commercieel inzetbaar te krijgen. Door voor het experiment - om een zwaar object op meerdere plekken te krijgen - te kiezen voor het MRFM-tipje, creëren we een win-winsituatie: wij kunnen gebruik maken van de al bestaande technieken en met ons onderzoek dragen wij weer bij aan de verdere ontwikkeling van de MRFM.

Het plan, zoals uitgelegd in hoofdstuk 5, is als volgt: We brengen de MRFM-tip naar een diamantje, dichtbij een plek waar we een enkel zeer speciaal atoommagneetje hebben ingebracht. Deze spin, aangeduid met NV^- , kunnen we nauwkeurig



Schets van het bedachte toekomstige experiment. In het diamant bevindt zich het NV^- -center. De speciale pyramide of kegelvorm zou opwarming van het MRFM-tipje zoveel mogelijk voorkomen. Een uitgebreide uitleg staat in paragraaf 5.5.

manipuleren met een laser. Deze techniek wordt gebruikt in kwantummechanische netwerken en is al ver ontwikkeld. Vervolgens laten wij de spin in twee richtingen tegelijkertijd draaien. De vraag is dan hoe lang het MRFM-tipje tegelijkertijd in twee richtingen zal bewegen.

Techniek

HET EXPERIMENT is makkelijker beschreven dan gedaan, want de condities waarin dit moet gebeuren zijn gecompliceerd. Doordat de MRFM-tip in contact is met de door de temperatuur trillende atomen waaruit het experiment is opgebouwd, moet het gehele experiment worden afgekoeld naar -273.14 graden Celsius, 0.01 graad boven het absolute nulpunt. Een lagere temperatuur zou het experiment nog

minder verstoren, maar in hoofdstuk 5 laten we zien dat door gebruik te maken van het experiment we vanaf deze temperatuur alle overige trillingen actief uit de MRFM-tip kunnen 'pompen'.

Gebruikelijk wordt de beweging van een MRFM-tip uitgelezen met behulp van een laser. Dit zou in dit experiment echter teveel opwarming geven en daarom meten wij de beweging van de MRFM-tip door de stroom te meten die het bewegende magnetische balletje opwekt in een supergeleidend elektrisch circuitje. Hoofdstuk 6 beschrijft onder andere het recept dat is gebruikt om de supergeleidende baantjes van 0.0004 mm breed in dit circuit te produceren. Daarnaast worden in hoofdstuk 6 nog meer methodes en technologie beschreven die wij hebben ontwikkeld of ingezet ten behoeve van dit experiment. Met name het positioneren van de tip, en het uitlezen van de positie van de MRFM-tip in de kou, zonder licht of magneetvelden te gebruiken, is een kritiek technisch onderwerp. Het nauwkeurig uitlezen van de afstand tussen twee elektrisch geladen plaatjes blijkt niet alleen handig te zijn voor het MRFM experiment, maar ook voor andere types microscopen die werken met een tipje en die de afstand willen weten tussen het tipje en het sample, zoals gedetailleerd beschreven is in het gepubliceerde artikel van hoofdstuk 7.

Wetenschappelijke bevindingen

UIT EERDER ONDERZOEK met MRFM bleek dat de gevoeligheid van de MRFM-tip minder wordt naarmate het magneetje dichterbij het oppervlak van het sample komt. Tot nog toe was er geen beschrijving die deze extra demping van beweging kon verklaren. De grondige theoretische analyse in hoofdstuk 2 laat zien dat de spins, waarvan we sommige willen meten, alle tezamen de MRFM-tip afremmen en de trillingstijd veranderen. Deze theorie is geverifieerd door in een MRFM-experiment de tip heel voorzichtig te laten naderen boven een stukje siliciumoxide,

zoals beschreven in hoofdstuk 3. Het effect neemt toe wanneer de temperatuur van het experiment afneemt. Tegenintuïtief is echter dat onder een bepaalde temperatuur het effect weer minder wordt. De theorie beschrijft de resultaten van het experiment nauwkeurig. De artikelen van beide hoofdstukken zijn gepubliceerd. Dit effect nauwkeurig begrijpen is van groot belang voor het experiment omdat de gevoeligheid van de MRFM-tip hoog moet zijn. We begrijpen hierdoor nu onder andere beter hoe zuiver het diamant en hoe schoon het oppervlak ten minste moet zijn. Tenslotte hebben wij een diamanten sample onder de MRFM gemonteerd. Met de nu bekende theorie van hoofdstuk 2 hebben wij de zuiverheid van het diamant (ongeveer 400 op de miljard atomen hoort niet in puur diamant thuis) en de oppervlakteverontreiniging (ongeveer 60 miljard spins per vierkante millimeter) kunnen meten. Verder hebben wij de mogelijkheden verkend om MRI te doen op deze atomen, onder deze omstandigheden. Daarmee vonden wij dat het magneetje nog kleiner mag, of dat we de spins harder moeten laten draaien.

Wij kunnen concluderen dat de eerste stappen technisch, theoretisch en experimenteel gezet zijn richting een experiment dat het natuurkundige wereldbeeld drastisch kan veranderen.