



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Quantum computation with Majorana zero modes in superconducting circuits

Heck, B. van

Citation

Heck, B. van. (2015, May 6). *Quantum computation with Majorana zero modes in superconducting circuits*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/32939>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/32939>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/32939> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Heck, Bernard van

Title: Quantum computation with Majorana modes in superconducting circuits

Issue Date: 2015-05-06

Samenvatting

Majorana toestanden zijn een speciaal soort deeltjes die kunnen verschijnen aan de eindpunten van supergeleidende draden of in magnetische vortices in supergeleidende films. Zij zijn interessant vanwege de voorspelling dat ze een nieuw soort “niet-Abelse” statistiek bezitten. Dat houdt in dat de aanwezigheid van meerdere Majorana toestanden in een supergeleider een ontarding in de grondtoestand veroorzaakt, en dat het uitwisselen van de positie van twee toestanden tot een rotatie van de golffunctie in deze ontarde ruimte leidt. Omdat opeenvolgende rotaties niet commuteren, kun je met een serie rotaties een gecompliceerde bewerking uitvoeren op de golffunctie. Deze bewerking kan een bouwsteen zijn voor een kwantumcomputer. Supergeleiders met Majorana toestanden hebben een ingebouwde bescherming voor fouten die bij de berekening kunnen optreden, vanwege het topologische karakter van de niet-Abelse statistiek.

Hoe je in de praktijk de Majorana toestanden kunt uitwisselen is makkelijker gezegd dan gedaan. De eerste zes hoofdstukken van het proefschrift bevatten een concreet voorstel om Majorana toestanden te manipuleren, uitgaande van bestaande technieken uit de supergeleidende elektronica. Het kernidee achter dit voorstel is dat de grondtoestand weliswaar ontard is als de supergeleider geaard is, maar dat de ontarding kan worden opgeheven als de supergeleider elektrisch geïsoleerd is. Dit is mogelijk omdat de ontarde toestanden corresponderen met een verschillend aantal elektronen. Het verschil in elektrostatistische energie kan in een elektrisch geïsoleerde supergeleider gemeten worden, en zo kun je de ontarding opheffen.

De elektrostatistische energie van een supergeleidend gebiedje kan heel nauwkeurig gecontroleerd worden door het magnetische veld te variëren in een zogenaamde Josephson-junctie, die de supergeleider met aarde verbindt. Dit is een bekende techniek uit de supergeleidende elektronica. Zo hebben we een praktische en nauwkeurige manier om de wisselwerking van de Majorana toestanden te beheersen. Het effect van een magnetisch veld op de Majorana toestanden wordt in hoofdstuk 2 bestudeerd in een zogenaamde DC SQUID geometrie, en in hoofdstukken 3 en 4 in grotere schakelingen, die meer mogelijkheden bieden: het uitwisselen van Majorana toestanden, het uitlezen van de rotatie van de golffunctie, en de toepassing op complexe bewerkingen. De uitwisselingsoperatie wordt uitgevoerd zonder de Majorana toestanden fysiek door de ruimte te bewegen, hetgeen grote praktische voordelen biedt.

Hoofdstuk 7 bevat de resultaten van een samenwerking met de experimentele groep van Dr. Leo DiCarlo in Delft. We analyseren het gedrag van eenvoudige schakelingen gemaakt van niobium-titaan-nitride, een bijzondere supergeleider die bestand is tegen hoge magnetische velden. Omdat de dichtheid van elektronen door een elektrisch veld kan worden gevarieerd, hebben deze schakelingen een resonantiefrequentie die variabel is. Mijn theoretische analyse van het microgolfspectrum toont aan dat de schakeling heel gevoelig is voor afwijkingen van de sinus-vorm in de stroom-fase relatie van de Josephson-junctie. Deze supergeleidende schakelingen vormen een eerste stap op weg naar de experimentele realisatie van de door ons ontworpen Majorana-schakelingen.

In de volgende hoofdstukken passen we de theoretische ideeën uit de eerdere hoofdstukken toe op gerelateerde problemen. In hoofdstuk 8 tonen we aan dat de elektrostatistische wisselwerking niet alleen nuttig is om Majorana toestanden in supergeleiders te manipuleren, maar ook van dienst kan zijn in het zogenaamde fractionele kwantum-Hall effect, waar ook het optreden van Majorana toestanden is voorspeld (bij vulfractie $\nu = 5/2$). Hoofdstuk 9 laat zien dat het idee om Majorana toestanden te verwisselen zonder ze fysiek door de ruimte te bewegen uitgebreid kan worden naar andere deeltjes met niet-Abelse statistiek, zogenaamde “niet-Abelse anyonen”. We hoeven slechts enkele eenvoudige veronderstellingen te maken over hun wisselwerking. In hoofdstuk 10 onderzoeken we de eigenschappen van zogenaamde parafermion-toestanden, die beschouwd kunnen worden als het analogon van de Majorana toestanden in het fractionele kwantum-Hall effect bij vulfractie $1/3$. Tenslotte, in hoofdstuk 11 behandelen we de transporteigenschappen van een reeks supergeleidende gebiedjes op de rand van een zogenaamde kwantum spin-Hall isolator. Dit is een veelbelovende methode om Majorana toestanden te realiseren. We laten zien dat elektrische wisselwerking een storend effect heeft op de elektrische geleiding (de kwantisatie verdwijnt), maar niet op de thermische geleiding (die blijft gekwantiseerd).