



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Dirac and Majorana edge states in graphene and topological superconductors

Akhmerov, A.R.

### Citation

Akhmerov, A. R. (2011, May 31). *Dirac and Majorana edge states in graphene and topological superconductors*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/17678>

Version: Not Applicable (or Unknown)  
License: [Leiden University Non-exclusive license](#)  
Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/17678>

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

## Samenvatting

De opgaande zon creëert een smalle band van licht aan de horizon, die de aarde scheidt van de lucht — ongeacht het profiel van de horizon. Op een soortgelijke wijze, verschijnen de elektronische toestanden die in dit proefschrift onderzocht worden aan de rand van een materiaal, niet omdat die rand een bijzondere structuur zou hebben, maar omdat er een fundamenteel verschil is tussen het materiaal binnen en de lege ruimte buiten.

Het eerste deel van het proefschrift is gewijd aan randtoestanden in grafeen, een enkele laag grafiet met koolstofatomen op een honingraatrooster. Het was oorspronkelijk gedacht dat alleen een speciaal type begrenzing, de zigzagrand, toestanden aan de rand kan binden. Echter, de analyse in hoofdstuk twee toont aan, dat randtoestanden in het algemeen verschijnen waar het honingraatrooster eindigt. Het kernpunt van deze analyse is de formulering van de meest algemene randvoorwaarde van de Diracvergelijking (die onbekend was, hoewel de Diracvergelijking al vroeg in de 20ste eeuw haar intrede deed in de natuurkunde).

De rest van het eerste deel behandelt waarneembare consequenties van randtoestanden. In het derde hoofdstuk laten we zien hoe een combinatie van supergeleiding en sterke magneetvelden de verborgen “valley” polarisatie van een randtoestand kan onthullen. (De bandstructuur van grafeen heeft twee “valleys”, gerelateerd door tijdsomkeersymmetrie.) Vervolgens, in hoofdstuk vier, presenteren we een analytische theorie van een stroomschakeleffect (bekend als de “valley valve”), dat in computersimulaties ontdekt was. Deze analyse onthulde een onverwacht verschil tussen zigzag en anti-zigzag nanodraden, wat niet met de Diracvergelijking beschreven kan worden. Tenslotte, in hoofdstuk vijf, stellen we een methode voor om randtoestanden direct te detecteren in een quantum dot in grafeen, rekening houdend met de versturende effecten van wanorde en tweede-naaste-buur koppelingen.

In het tweede deel van het proefschrift verschuift de focus van randtoestanden in grafeen naar Majorana randtoestanden in supergeleiders. Beide typen van randtoestanden verschijnen ten gevolge van fundamentele overwegingen, ongeacht de microscopische eigenschappen van de rand. De bijzondere eigenschap van Majorana deeltjes is dat zij hun eigen antideeltje zijn, en dientengevolge geen lading of spin hebben. Majorana randtoestanden zijn voorspeld in supergeleiders met een ongebruikelijke “chirale  $p$ -golf” paarsymmetrie. Gewone  $s$ -golf supergeleiders kunnen ook gebruikt worden, in combinatie met materialen die een sterke spin-baan koppeling hebben (topologische isolatoren). Majorana deeltjes zijn aantrekkelijk omdat ze naar verwachting een zeer lange

coherentie-tijd hebben. Ons doel in dit deel van het proefschrift is om experimentele signalen van Majorana randtoestanden te identificeren, alsook om hun potentieel te onderzoeken voor quantumcomputers.

In hoofdstuk zes analyseren we de redenen voor de bescherming tegen decoherentie van Majorana deeltjes. We laten zien dat het sleutelprincipe het behoud is van de pariteit van het deeltjesaantal. In tegenstelling tot bezorgde verwachtingen in de literatuur, leiden thermische excitaties niet tot decoherentie. Dit is van cruciaal belang, omdat het onderdrukken van thermische excitaties een onrealistisch lage temperatuur van  $10^{-4}$  K zou vereisen. In de volgende twee hoofdstukken stellen we methodes voor om Majorana randtoestanden te detecteren. Aangezien zij ladingsneutraal zijn, is het centrale probleem hoe ze te koppelen aan een elektrische stroom. In hoofdstuk zeven laten we zien dat een Cooper-paar zich opsplijt in twee elektronen als het geïnjecteerd wordt in een tweetal Majorana toestanden. In het volgende hoofdstuk stellen we een “Dirac-tot-Majorana” converter voor, die op reversibele wijze een elektrische stroom van gewone (Dirac) elektronen transformeert in een neutrale stroom van Majorana randtoestanden. (Het ladingstekort wordt geabsorbeerd door het supergeleidende condensaat.) Dit idee is ook voorgesteld door Liang Fu en Charles Kane, en verscheen in een aflevering van de Amerikaanse sitcom *The Big Bang Theory*.

In hoofdstuk negen passen we deze ideeën toe op chirale  $p$ -golf supergeleiders. We voorspellen dat als twee domeinen van tegengestelde chiraliteit in contact worden gebracht, hun gezamenlijke rand een elektrische stroom geleidt — terwijl de afzonderlijke randen slechts een ladingsneutrale stroom kunnen dragen. In hoofdstuk tien bestuderen we de topologische fase-overgang naar een fase die Majorana toestanden bevat. We vinden dat het overgangspunt in een draad-geometrie gekenmerkt wordt door een piek van gequantiseerde thermische geleiding en gequantiseerde elektrische hagelruis — zonder de effecten van een eindige afmeting die gewoonlijk een fase-overgang vergezellen. In hoofdstukken elf en twaalf benutten we een formele overeenkomst met het Ising-model in een transversaal veld om de niet-Abelse statistiek te analyseren van Majorana deeltjes. (Dit zijn de twee technisch meest ingewikkelde hoofdstukken van het proefschrift.) Tenslotte, in hoofdstuk dertien, presenteren we een nieuw schema voor een quantum computer gebaseerd op Majorana deeltjes, gebruik makend van het Aharonov-Casher effect (het duale van het meer bekende Aharonov-Bohm effect). Het voordeel van dit nieuwe schema is dat het ongevoelig is voor thermische excitaties (in overeenstemming met de bevindingen van hoofdstuk zes).