



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Applications of topology to Weyl semimetals and quantum computing**

O'Brien, T.E.

### **Citation**

O'Brien, T. E. (2019, June 20). *Applications of topology to Weyl semimetals and quantum computing*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/74471>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/74471>

**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/1887/74471>

**Author:** O'Brien, T.E.

**Title:** Applications of topology to Weyl semimetals and quantum computing

**Issue Date:** 2019-06-20

# Samenvatting

Dit proefschrift behandelt onderwerpen uit twee onderzoeksgebieden. De eerste twee hoofdstukken hebben betrekking op het bestuderen en voorspellen van elektronische eigenschappen van een exotische klasse van nieuwe materialen — zogenaamde Weyl-semimetalen. De resterende vijf hoofdstukken bestuderen enkele van de vereiste onderdelen voor de besturing en werking van een toekomstige quantumcomputer — de hardware laag, de software laag, en de laag van foutcorrectie die daartussen nodig is. Het thema dat deze delen verbindt, is topologie; het idee dat de eigenschappen van een systeem afhangen van macroscopische in plaats van microscopische kenmerken. In quantuminformatie leidt dit tot de contra-intuïtieve voorspelling dat er macroscopische vrijheidsgraden kunnen worden ontworpen die bestand zijn tegen ruis. Dit is contra-intuïtief aangezien quantumverschijnselen in principe sneller vervallen in grotere systemen, dan in kleinere systemen. Om deze reden is de quantumwereld tot de 20e eeuw onopgemerkt gebleven.

In het eerste deel onderzoeken we topologische effecten in de vaste stof fysica. In de vaste stof zorgt topologie voor het bestaan van systemen met bijzondere deeltjes, die niet aan de gebruikelijk Schrödingervergelijking voldoen: deeltjes in een Weyl-semimetaal voldoen aan de Weyl-vergelijking, en deeltjes in supergeleidende nanodraden voldoen aan de Majorana-vergelijking. Deze vergelijkingen komen uit de hoge-energiefysica en het was onverwacht dat ze in de lage-energie fysica van de vaste stof zijn opgedoken. De topologie van de elektronische bandstructuur zorgt ervoor dat deze deeltjes stabiel zijn ook als er imperfecties in het materiaal aanwezig zijn.

Een belangrijk kenmerk dat voortkomt uit de elektronische structuur van een metaal is hoe de eigenschappen ervan variëren onder invloed van een magnetisch veld. Dit heeft toepassingen in de elektronische en computerindustrie, maar biedt ook een middel om de elektronische structuur zelf te bestuderen. Een Leidse ontdekking is de periodieke variatie van materiaaleigenschappen (specifieke warmte, elektrische weerstand) als functie van het magneetveld, effecten die naar de ontdekkers genoemd zijn (het de Haas-van Alphen effect en het Shubnikov-de Haas effect — prof. W.J. de Haas was een opvolger van Kamerlingh Onnes). In hoofdstuk 2

## *Samenvatting*

laten we zien hoe een speciaal soort Weyl-semimetalen (type-II genaamd) door deze metingen bestudeerd kan worden. Het effect dat optreedt is dat elektronen kunnen tunnelen tussen verschillende toegestane orbitalen op een manier die analoog is aan het Klein-tunnelingeffect uit de hoge-energiefysica. De topologie van dit effect vindt haar oorsprong in het feit dat twee lijnen die rond een Möbius-band lopen elkaar op minstens één punt moeten kruisen.

Een van de meest verrassende voorspellingen in Weyl-semimetalen staat bekend onder de naam chiraal magnetisch effect, wat verwijst naar het optreden van een elektrische stroom parallel aan een aangelegd magnetisch veld. Dit is onverwacht omdat geladen deeltjes, volgens de Lorentzkracht, loodrecht op een magnetisch veld worden versneld. Men kan inderdaad bewijzen dat de ijsymmetrie van het elektromagnetisme een evenwichtsstroom evenwijdig aan een aangelegd magnetisch veld verbiedt. De ijsymmetrie is echter gebroken in een supergeleider, waardoor het chiraal magnetische effect in evenwicht tot de mogelijkheden behoort. In hoofdstuk 3 demonstreren we het optreden van een superstroom in evenwicht langs het magnetische veld, als manifestatie van het chiraal magnetische effect. De stroom van geladen deeltjes wordt gecompenseerd door een tegengestelde stroom van neutrale deeltjes, zodat er netto geen warmtestroom optreedt in evenwicht — hetgeen door thermodynamische principes verboden wordt. De richting van de elektrische stroom is afhankelijk van de vraag of de Weyl-deeltjes een linkshandige of rechtshandige chiraliteit hebben.

In deel twee van dit proefschrift verleggen we onze focus naar topologische effecten in quantumcomputers. Allereerst onderzoeken we quantumfoutcorrectie, waarbij topologie wordt gebruikt om de informatie op een meer robuuste wijze in een quantumcomputer op te slaan. Hoewel algemeen wordt aangenomen dat fouttolerante quantumberekeningen uiteindelijk mogelijk zullen zijn, ontbraken nauwkeurige numerieke voorspellingen van de mate waarin fouten met de huidige hardware gecorrigeerd kunnen worden. In hoofdstuk 4 verhelpen we dit door een simulatie uit te voeren van een prototype van een code voor quantumfoutcorrectie, bekend als de “surface code”, op supergeleidende quantum hardware met 17 qubits (“Surface-17”). Als onderdeel hiervan beschrijven en ontwikkelen we een expliciet schema voor het meten van de prestaties van de Surface-17-chip. Met de simulatie die in dit werk is ontwikkeld, kunnen we de experimentele prestaties nauwkeurig modelleren als functie van het soort verstoringen wat op kan treden. Deze mogelijkheid is sindsdien essentieel gebleken voor zowel theoretische als experimentele studies van de quantum hardware.

Zoals vermeld in het vorige hoofdstuk, is quantumfoutcorrectie gebaseerd

op een methode om lokale fouten te diagnosticeren en te corrigeren (“decoderen”), voordat ze zich ophopen en de quantuminformatie onherstelbaar beschadigen. Het optimaliseren van deze decoding vereist gedetailleerde kennis van de onderliggende foutpercentages. In hoofdstuk 5 onderzoeken we hoe iemand deze kennis precies kan bepalen binnen het kader van één van de meest populaire decodeeralgoritmen, gebaseerd op een probleem uit de grafentheorie. We testen en demonstreren deze decoder zowel voor het schatten van onderliggende foutpercentages in een statisch systeem, als voor het bijhouden van veranderingen in de tijd in een dynamisch systeem. We vinden dat de decoder de tijdsafhankelijke variaties van de foutpercentages in een supergeleidende quantumchip tot op een tijdschaal onder de milliseconde kan bijhouden.

De voorgaande twee hoofdstukken hadden betrekking op foutcorrectie voor de surface code, wat een populaire topologische code is voor quantumfoutcorrectie. Een andere topologische code, de “color code”, heeft voordelen boven de surface code, maar onderzoek aan deze alternatieve code wordt gehinderd door het gebrek aan goede decoders. In hoofdstuk 6 gebruiken we de techniek van machinaal leren door middel van een neurale netwerk om een decoder voor de color code te ontwikkelen. We demonstreren in een simulatie dat ons effectief bescherming biedt tegen veelvuldig voorkomende fouten in de quantumberekening. Voor zover aan ons bekend is dit de best presterende decoder voor de color code tot nu toe. Een bijkomend voordeel van het neurale netwerk, is dat het bruikbaar is voor andere topologische codes, voor de methode van machinaal leren maakt het immers niet uit welke de code is. Dit biedt interessante mogelijkheden voor vervolgonderzoek.

In de laatste twee hoofdstukken onderzoeken we toekomstige implementaties van quantumcomputers en de algoritmen die daarop kunnen worden uitgevoerd. Majoranadeeltjes zijn veelbelovend voor quantumberekeningen en worden om die reden intensief onderzocht als mogelijke qubits. Vanwege hun topologische bescherming verwacht men lagere foutpercentages dan met de gangbare qubits (die ook met foutcorrectie nog heel beperkte mogelijkheden hebben). Wij hebben onderzocht of Majoranadeeltjes nuttig ingezet kunnen worden voor berekeningen uit de quantumchemie. Dat is niet vanzelfsprekend, omdat de deeltjes in een molecuul elektronen (of meer in het algemeen fermionen) zijn en geen Majoranadeeltjes. In hoofdstuk 7 stellen we een schema voor waarin men paren van Majoranadeeltjes kan combineren om er fermionen van te maken. We laten zien hoe bekende quantumoperaties voor qubits kunnen worden herschreven in de taal van fermionen, zonder eerst de gebruikelijke omweg te maken via spinvariabelen.

## *Samenvatting*

Om quantumchemieberekeningen op een quantumcomputer uit te voeren met een versnelling ten opzichte van klassieke computers, moet men bestaande algoritmen aanpassen aan de mogelijkheden en onmogelijkheden van quantumcomputers. Het belangrijkste algoritme heet quantumfaseschatting. Zoals de naam aangeeft, biedt dit algoritme een manier aan om de fase te bepalen die wordt opgebouwd in de tijd wanneer een quantumtoestand via de Schrödingervergelijking evolueert. Bekende algoritmes voor quantumfaseschatting vereisen een nauwkeurige bereiding van de golffunctie, wat veel extra qubits kost. In het laatste hoofdstuk van dit proefschrift laten we zien hoe men de efficiëntie van het algoritme aanzienlijk kan verbeteren door gebruik te maken van de methode van Prony om fase-informatie uit een quantumcomputer te extraheren. Deze methode heeft voordelen boven de gangbare Fourieranalyse, omdat het minder qubits nodig heeft om toch een fijne resolutie te behalen. We bestuderen de prestatie van deze methode met behulp van de simulatietechniek uit hoofdstuk 4.