



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Dislocations in stripes and lattice Dirac fermions

Mesaroš, A.

Citation

Mesaroš, A. (2010, October 6). *Dislocations in stripes and lattice Dirac fermions*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/16013>

Version: Corrected Publisher's Version

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/16013>

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

SAMENVATTING

Tastbare stukken materiaal, die dezelfde lengte- en tijdschalen hebben als mensen, bezitten een fantastische reikwijdte aan natuurkundige fenomenen en verrassende eigenschappen. Deze kunnen we gebruiken om betere en nieuwe technologieën te ontwikkelen, maar ook om fundamentele, theoretische vragen op een nieuwe manier te bestuderen. De weelde aan fenomenen in zulke materialen wordt veroorzaakt door het feit dat een collectie van microscopisch kleine deeltjes, zoals de fundamentele elektronen, zich radicaal anders kan gedragen dan de deeltjes apart. We kunnen hun collectieve respons alleen meten als we het systeem onderzoeken bij lage energiën en impulsen. Het systeem wordt dan gekarakteriseerd door een *effectieve* theorie, die effectieve deeltjes kan beschrijven die niet noodzakelijk op de oorspronkelijke deeltjes lijken en zelfs het gedrag kunnen imiteren van de verscheidene elementaire deeltjes uit de natuur.

De verschillende fasen waarin het macroscopische systeem zich kan bevinden, zijn gewoonlijk te onderscheiden door verschillende ruimte-tijd- of interne symmetrieën. De effectieve theorie kan in die gevallen het gedrag van de fysieke *ordeparameter* beschrijven. Dat is een grootte die lokaal de mate weergeeft waarin de symmetrie gebroken is en zo de toestand van een systeem karakteriseert. Een speciale rol is weggelegd voor *topologische defecten*. Een topologisch defect in tweedimensionale systemen, zoals degenen die in dit proefschrift zijn bestudeerd, is een configuratie waarin de ordeparameter in een punt verdwijnt. Dit punt is de kern van het defect. De ordeparameter verdwijnt omdat zijn waarden op een lus rond dat punt op een bepaalde manier “draaien”, zodanig dat die niet “glad” worden gestreken als we de lus strakker om de kern trekken. De topologische defecten zijn dus stabiele en robuuste configuraties die fundamenteel de orde in een systeem vernietigen.

In dit proefschrift bestuderen we twee verschillende typen van systemen die zogenaamde *dislocaties* bevatten (dat zijn een soort topologische defecten). Roosterdislocaties vernietigen lokaal de orde van het kristalrooster door de translatiesymmetry van de vrije ruimte te herstellen — als we de stappen tellen langs elk willekeurig pad rond de dislocatie, vinden we dat er altijd een vast aantal stappen ontbreekt. In Hoofdstuk 2 tot en met 5 onderzoeken we het effect van dislocaties op *grafeen* en tweedimensionale *topologische isolatoren*: systemen waarin de effectieve theorie van niet-wisselwerkende elektronen fundamentele Diracfermionen beschrijft. In Hoofdstukken 6 en 7 bestuderen we een effectieve theorie van

sterk wisselwerkende elektronen in koperen supergeleiders met een hoge kritische temperatuur (hoge T_c), genaamd “cupraten”. Deze effectieve theorie beschrijft de lokale patronen van het breken van translatie- en rotatiesymmetrie. Een prominente rol is weggelegd voor *lijndislocaties*: topologische dislocatiedefecten in stapels van parallelle lijnen van lading genaamd “stripes”.

In Hoofdstuk 2 bestuderen we het verband tussen elektronen in grafeen met topologische defecten en de fundamentele theorie van Diracfermionen in een gekromde ruimte. We bekijken disclinaties (topologische defecten die de rotatiesymmetrie van de vrije ruimte herstellen) en dislocaties, die corresponderen met een ruimte-tijd met respectievelijk kromming en torsie. We laten zien dat elektronen in grafeen met defecten op dezelfde manier worden getransporteerd als fundamentele Diracfermionen in een zelfde, niet-triviale 2+1-dimensionale ruimte-tijd, onder het voorbehoud dat de elektronen de roosterconstante onthouden door de eindige Fermi-impuls, geassocieerd met het grafeenrooster. Het resultaat is dat het effect van de roosterconstante correspondeert met gewijzigde Euclidische symmetriegeneratoren van de onderliggende ruimte.

In Hoofdstuk 3 onderzoeken we de observabelen die beïnvloed worden door de Berryfase van de grafeenelektronen, veroorzaakt door de topologische actie van de roosterdislocaties. Een beschouwing van de elementaire schaal van een Aharonov-Bohmring van grafeen leidt tot een schijnbare schending van de basiswet van lineair transport dat de magneto-geleiding even is in de toegepaste flux. We bespreken deze tegenspraak met Feynmans voorstelling van *dephasing* met behulp van paden als we de overgang onderzoeken van quantum- naar klassiek gedempt transport. We nemen voor deze opstelling ook de effecten van *dephasing* mee door gebruik te maken van het *Büttiker dephasing voltage probe-type model*, waar de magneto-geleiding even blijft in de flux, ook wanneer verschillende *dephasing*-tijden zijn toegestaan voor de individuele, door tijdsomkeer verbonden elektrontoestanden.

In Hoofdstuk 4 bestuderen we de zogenaamde *grain boundaries* van grafeen: uitgestrekte defectstructuren die op de grens tussen twee stukken grafeen met verschillende oriëntaties vormen. We introduceren een model voor amorfe *grain boundaries* en zien dat stabiele structuren langs de rand verantwoordelijk zijn voor een toename in de lokale toestandsdichtheid, die gevonden is met *scanning tunneling spectroscopy*. We beschouwen ook de continuümtheorie van groepen dislocaties in grafeen en laten zien dat die gelokaliseerde toestanden zonder energie voorspelt, gelijk aan wat experimenten hebben getoond. Door nadere beschouwing van de roosterschaaleffecten bij het analyseren van stabiele dislocatiekernen, laten we zien dat deze inderdaad toestanden zonder energie hebben.

In Hoofdstuk 5 staan de tweedimensionale topologische isolatoren centraal. We laten zien dat roosterdislocaties spinstromen induceren op de randen van het systeem. We stellen een experiment voor dat, gebruik makende van dit feit, de ongrijpbare Majoranafermiontoestanden kan identificeren die, naar men gelooft, voorkomen in topologische isolator — supergeleider — ferromagneetstructuren. Het identificeren van deze fermionen is belangrijk voor toepassingen in quantum

computers. Het door ons voorgestelde experiment bestaat uit een simpele meting van de geleiding in een interferometer, gevormd door twee puntcontacten op de rand, die de Majoranatoestanden kan identificeren door de spinstroom die wordt geïnduceerd door de dislocatie.

In Hoofdstuk 6 bestuderen we elektron-fononkoppelingseffecten in cupraten als de elektronen een sterke, statische *stripe* orde hebben. We laten zien dat de sterke anomalieën in het hoge-energie, LO-fononspectrum kunnen worden verklaard door een versterkte elektronische polariseerbaarheid, geassocieerd met het eendimensionale karakter van metallische *stripes*. In tegenstelling tot modellen van transversale *stripe*-fluctuaties, komt de anomalie voor bij impulsen parallel met de *stripes*. We verklaren de doteringafhankelijkheid van de anomalie, en voorspellen dat de lijnbreedte van de fonon, en de spreiding van de anomalie in de transversale impuls afnemen met toenemende temperatuur. Metingen met hoge resolutie moeten een karakteristieke substructuur van de anomalie laten zien.

In Hoofdstuk 7 onderzoeken we de wisselwerking van lokale symmetriebrekingspatronen (zoals gemeten in de cupraten), met inbegrip van *stripe* (translatie) en inter-eenheidscel, nematische (oriëntatie) orde. We demonstreren hoe *stripe*-dislocaties te zien zijn in *scanning tunneling microscopy*-data. Vervolgens laten we met algemeen geldende argumenten zien dat ze een typische, niet-destructieve voetafdruk achterlaten in de nematische orde. Deze voetafdruk is op directe wijze te zien in metingen van de lokale, nematische ordeparameter.