



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Nano-scale electronic structure of strongly correlated electron systems

Tromp, W.O.

### Citation

Tromp, W. O. (2022, December 20). *Nano-scale electronic structure of strongly correlated electron systems*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3503554>

Version: 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/1887/3503554>

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

---

# Samenvatting

Een veel voorkomende strategie om de elektronische eigenschappen van de meeste alledaagse materialen te verklaren is de reductionistische invalshoek. Deze strategie begint met het identificeren en grondig bestuderen van de kleinste bouwsteen van het systeem, elektronen in dit geval, om vervolgens de eigenschappen van die bouwsteen op te schalen naar de schaal van het gehele systeem. Cruciaal is dat hierbij wordt genegeerd hoe deze bouwstenen samen passen, hoe de elektronen onderling wisselwerken. Deze aanpak werkt verrassend goed in het beschrijven van de meeste materialen, ondanks de sterke Coulomb afstoting die elektronen tussen elkaar zouden moeten voelen.

Hedendaags onderzoek focust steeds meer op een groep materialen, genaamd sterk gecorreleerde elektron materialen, waarmee de reductionistische strategie steeds meer moeite heeft om die te verklaren. In zulke systemen is de Coulomb wisselwerking een cruciale factor in de eigenschappen van het materiaal. Een van de consequenties hiervan is dat het aantal elektronen in het systeem een belangrijke rol can spelen op manieren die voorbij gaan aan de reductionistische strategie. Een van de meest notoire voorbeelden hiervan zijn de koperoxide hogetemperatuursupergeleiders. Deze supergeleiders komen voort uit een isolerend systeem waar de Coulomb afstoting dusdanig sterk is dat de elektronen op hun plaats zijn vast gevoren. Een kleine verandering in het aantal elektronen in dit systeem veroorzaakt een verscheidenheid aan onconventionele elektronische toestanden, waaronder een supergeleidende toestand met de hoogst bekende kritische temperatuur bij omgevingsdruk. Hoe supergeleiding hier vormt en weer verdwijnt, en de relatie met het originele, sterk isolerend systeem, is een open vraag sinds de ontdekking van deze systemen die zeer actief onderzocht wordt.

De nanometer lengteschaal biedt een unieke blik op sterk gecorreleerde systemen. De elektronische eigenschappen kunnen sterkt variëren op deze schaal, en het vloeien van elektronen op deze schaal kan worden gekenmerkt door hydrodynamische fenomenen die niet mogelijk zijn op grotere lengteschalen. In dit proefschrift presenteren wij onze bijdrage aan het sterk gecorreleerde elektronsystemen vakgebied door precies deze nanoschaal te onderzoeken. Hiervoor maken wij gebruik van scanning tunneling microscopie (STM) die ons in staat stelt om de lokale verdeling van elektronen, of de lokale toestandsdichtheid, te meten met subatomaire precisie. Ook zullen

we onderzoeken hoe elektronen stromen door mesoscopische structuren van sterk gecorreleerde materialen.

In hoofdstuk 2 bestuderen we nader hoe we precies onderzoek doen aan sterk gecorreleerde systemen door drie spectroscopische technieken met elkaar te vergelijken. De drie technieken in kwestie, ARPES, STM, en kwantum oscillaties, meten ieder (aspecten) van de bandenstructuur van een materiaal. Om te zien hoe deze technieken vergelijken passen we ze ieder toe op  $\text{Sr}_2\text{RhO}_4$ , een modelsysteem, een metaforische drosophila, voor Fermi vloeistoffen. We brengen het Fermi oppervlak in kaart met behulp van zowel ARPES als quasideeltjes interferentiepatronen (QPI) waargenomen door STM, en vergelijken deze met de Fermi oppervlaktes bepaald aan de hand van kwantum oscillaties. De Fermi snelheden bepaald door deze drie technieken krijgen dezelfde behandeling, alsmede quasideeltjes vervaltijd bepaald door ARPES en STM. In al deze gevallen zijn de drie technieken in overeenkomst. Dit leidt ons tot de conclusie dat de discrepanties tussen deze technieken die zich voordoen voor andere sterk gecorreleerde systemen een reflectie zijn van de onderliggende fysica.

Vervolgens verleggen wij onze aandacht naar de koperoxide hogetemperatuur-supergeleiders, in het bijzonder de overgedoteerde supergeleiders voor welke de kritische temperatuur omlaag gaat bij hogere doteringsniveaus. In hoofdstuk 3 meten we de lokale toestandsdichtheid met STM voor verscheidene monsters die een breed bereik aan doteringsniveaus beslaan, inclusief een monster met een dusdanig veel gedoteerd dat hij niet meer supergeleidend is. Dit stelt ons in staat om nauwkeurig het afbreken van supergeleiding in dit materiaal te bestuderen. Wij observeren de formatie van steeds meer nanometer grote metallische regio's in de supergeleidende toestand wanneer de kritische temperatuur daalt. In het bijzonder zien we supergeleidende regio's in het monster dat niet meer supergeleidend is op een macroscopische schaal. Ook zien we dat het spectroscopische gat waar supergeleiding mee geassocieerd is niet verdwijnt door het sluiten van dat gat, maar door een toenemende toestandsdichtheid op het Fermi niveau, het dempen van dat gat. Het opbreken van de Cooperparen verantwoordelijk voor het dempen blijkt een zeer ongebruikelijke correlatie te hebben met de grootte van het supergeleidend gat. Deze waarnemingen vormen samen een beeld van een emergente granulaire supergeleider in de sterk overgedoteerde koperoxide supergeleiders waarin een paarbrendend proces bepalend is dat niet door de meest gangbare theoretische modellen kan worden gevat.

In hoofdstuk 4 bestuderen wij de elektronische structuur van dezelfde koperoxide supergeleiders in de momentumruimte door de interferentiepatronen van de quasideeltjes waar te nemen met STM. Om de signaalruisverhouding van onze STM beelden te verhogen implementeren we een machine learning algoritme om de ruis te onderdrukken. Het gebruik van een zelfsupervisie tijdens het trainen maakt het mogelijk om effectief de ruis te onderdrukken zonder de grote hoeveelheden aan data die de meer traditionele supervisie van machine learning nodig heeft. Onze QPI beelden van de overgedoteerde koperoxide supergeleiders laten een volledig Fermi oppervlak zien met een band bij de antinodi die rigide verschuift als functie van doteringsniveau. We merken op dat verschillende bepalingen van het exacte doteringsniveau door verschillende meetmethodes niet overeen komen. We zien ook dat de band nabij het Fermi niveau wordt omgebogen door het supergeleidend gat, en de aanwezigheid van een kenmerk die geassocieerd kan worden met een bijkomende geordende toestand. De aanwezigheid van dit kenmerk over een breed bereik van doteringsniveaus is in tegenspraak met eerdere claims van ladingsdichtheidsgolven of ferromagnetische fluctuaties in overgedoteerde koperoxide supergeleiders.

In hoofdstuk 5 nemen we afstand van metingen van de toestandsdichtheid, en bestuderen we in de plaats daarvan elektrisch transport door mesoscopische structuren. Op deze schaal kunnen de wisselwerkingen tussen de elektronen onderling leiden tot transportverschijnselen die typisch geassocieerd worden met hydrodynamica, ervan uitgaande dat de wanorde in het materiaal niet te groot is. We beargumenteren dat de sterk gecorreleerde onconventionele supergeleider  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  de juiste combinatie van sterke wisselwerking en weinig wanorde heeft om zulk hydrodynamisch gedrag te vertonen. Gebruik makend van de Navier-Stokes vergelijking aangepast om ook wanorde te beschrijven simuleren we het vloeien van elektronen door een  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  structuur wiens ontwerp eerder is toegepast om hydrodynamisch gedrag aan te tonen, en rekenen we het verwachte voltage verschil uit over de structuur. We herhalen dit proces voor de vreemde metaal toestand van de koperoxide supergeleiders gebruik makend van resultaten van een holografische omschrijving van die toestand. Het toepassen van ons model voor hydrodynamisch transport in combinatie met wanorde laat zien dat de sterkere aanwezigheid van wanorde in vergelijking met  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  in combinatie met de extreem lage viscositeit die de vreemde metalen hebben volgens de holografische omschrijving ertoe leiden dat hydrodynamische verschijnselen zeer onwaarschijnlijk zijn. Ondanks dit resultaat vinden we het nog steeds de moeite waard om zulk

---

soort experimenten te doen voor koperoxide supergeleiders, gegeven de beperkte hoeveelheid data beschikbaar voor mesoscopisch transport voor deze systemen.