



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Visualizing strongly-correlated electrons with a novel scanning tunneling microscope

Battisti, I.

Citation

Battisti, I. (2019, May 8). *Visualizing strongly-correlated electrons with a novel scanning tunneling microscope*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/72410>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/72410>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/72410> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Battisti, I.

Title: Visualizing strongly-correlated electrons with a novel scanning tunneling microscope

Issue Date: 2019-05-08

Samenvatting

De elektronische eigenschappen van de meeste materialen om ons heen kunnen met het vrije-elektronenmodel worden beschreven. Dit betekent dat de elektronen in het materiaal bijna geen afstotende Coulombkracht voelen, en dat ze vrijwel onafhankelijk van elkaar behandeld kunnen worden.

De afstotende Coulombkracht is echter in sommige bijzondere materialen niet verwaarloosbaar. Deze materialen worden ‘sterk gecorreleerde elektronensystemen’ genoemd. De interacties tussen de elektronen leiden tot nieuw emergent, collectief gedrag, dat niet te verklaren is als een som van het gedrag van individuele elektronen. Gecorreleerde elektronen veroorzaken veel bijzondere verschijnselen in de fysica van de gecondenseerde materie. Een van de beroemdste voorbeelden hiervan is hogetemperatuursupergeleiding. Nog steeds begrijpen natuurkundigen niet helemaal hoe dit fenomeen werkt, en er is meer experimenteel en theoretisch onderzoek nodig om dit probleem helemaal te doorgronden.

Dit proefschrift beschrijft mijn bijdrage aan een beter begrip van sterk gecorreleerde elektronensystemen en bestaat uit twee delen. Eerst wordt het ontwerp en de constructie beschreven van een nieuwe, ‘state-of-the-art’ scanning tunneling microscoop (STM) om hogere datakwaliteit te bereiken. Dit is nodig om de allerkleinste details van sterk gecorreleerd elektronensystemen beter te kunnen meten. Daarna bestuderen we met scanning tunneling microscopie hoe de elektronische eigenschappen van een Mott-isolator veranderen als we extra elektronen aan het materiaal toevoegen door te doteren.

De techniek van scanning tunneling microscopie en spectroscopie wordt in hoofdstuk 2 beschreven. Met een STM kunnen we de toestandsdichtheid van de elektronen met atomaire resolutie meten. Dit is erg belangrijk bij sterk gecorreleerde elektronensystemen, omdat de elektronische structuur vaak op de nanoschaal varieert. Mede hierdoor heeft STM in de afgelopen twintig jaar bijgedragen aan cruciale ontdekkingen in het gebied van sterk gecorreleerde elektronensystemen. Toch is STM een moeilijke techniek;

de microscoop is heel gevoelig voor trillingen die de meting kunnen beïnvloeden door het signaal in de ruis te verbergen.

In hoofdstuk 3 van dit proefschrift beschrijf ik het ontwerp, de constructie en de prestatie van onze STM die we Dome noemen. Dome opereert bij de lage temperatuur van 4 Kelvin, en is extreem stijf. Een stijvere STM heeft als gevolg dat externe trillingen de meting minder beïnvloeden, en dus dat we makkelijker door de ruis heen kunnen kijken. Door gebruik te maken van stijve materialen, zoals saffier, en dit te combineren met eindige-elementenmethode om het ontwerp te verbeteren, hebben we, voor zover nu bekend, de stijfste lage temperatuur STM ter wereld gebouwd.

In hoofdstuk 4 en 5 bestuderen we het iridaat Sr_2IrO_4 met een andere STM. Dit materiaal is een Mott isolator door de sterke spin-baan koppeling. Mott isolatoren zijn een simpel voorbeeld van sterk gecorreleerde elektronensystemen. Als gevolg van de sterke afstotende Coulombkracht, zitten elektronen in dit soort materialen vast op hun atomen in het kristalrooster. Ze zijn dan ‘bevroren’, en het materiaal gedraagt zich als een elektrische isolator. In sommige Mott isolatoren kunnen de elektronen ‘ontdooit’ worden door extra elektronen aan het materiaal toe te voegen door middel van doteren. Echter zorgt het ‘smelten’ van de elektronen voor nieuwe exotische eigenschappen die nog niet helemaal begrepen worden omdat de sterke interacties tussen de elektronen nog steeds een grote rol spelen. Cupraten, bijvoorbeeld, kunnen door dotering van Mott isolatoren in hogetemperatuursupergeleiders veranderen.

In hoofdstuk 4 bestuderen we de licht gedoteerde Mott isolator $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{IrO}_4$ (strontium lanthanum iridaat), waarin 2% tot 5% van de Sr-atomen door La-atomen zijn vervangen. Dit is in principe een compleet ander materiaal dan de cupraat-hogetemperatuursupergeleiders. Desondanks nemen we in dit materiaal dezelfde elektronische fasen waar die in cupraten bij lage doteringsniveaus gevonden zijn, namelijk ‘pseudogap’ en ‘charge order’. Deze fasen zijn tot nu toe in geen enkel ander materiaal dan cupraten gevonden, en onze ontdekking toont aan dat ze universele eigenschappen zijn van een klasse van Mott isolatoren. Vervolgens bestuderen we hoe het smeltingsproces van de bevroren Mott fase precies plaats vindt. We vinden dat de extra elektronen tot een bepaald doteringsniveau geen invloed op de Mott isolator hebben. Pas boven deze drempel beginnen de bevroren elektronen te smelten. Bovendien gebeurt dit smeltingsproces plaatselijk in kleine ‘pseudogap-plassen’ van enkele nanometers rond de doteringsatomen. Aangezien de eigenschappen van de iridaten lijkt op die van de cupraten, voorspellen we dat als er een hoog genoeg doteringsniveau bereikt wordt, de iridaten ook supergeleiders zullen worden.

Tijdens het bestuderen van de iridaten stuitten we ook op een ander bijzonder verschijnsel. We zien hier dat bij een doteringspercentage van onder de 4%, strontium lanthanum iridaat geen goede geleider is. In hoofdstuk 5, bestuderen we de oorzaak van dit verschijnsel. We zien hier dat het elektrisch veld bij de naald van de STM

het materiaal kan penetreren vanwege slechte afscherming door de elektronen. Dit verschijnsel is bekend in halfgeleiders onder de naam ‘tip-induced band bending’. Het begrip van dit verschijnsel is belangrijk, aangezien het invloed zou kunnen hebben op het resultaat van de meting. Dit kan bijvoorbeeld resulteren in een verandering van de gemeten breedte van de ‘Mott gap’. Bij lage doteringsniveaus meten we bij de iridaten een ‘Mott gap’ die afwijkt van eerder gepubliceerd onderzoek. We ontwikkelen een model dat voor ‘tip-induced band bending’ in Mott isolatoren corrigeert, waarmee we de echte breedte van de Mott gap in licht gedoteerd Sr_2IrO_4 terugkrijgen. Bovendien is ons model ook geschikt voor andere licht gedoteerde Mott isolatoren.

In hoofdstuk 6 presenteren we data van het rhodaaat Sr_2RhO_4 dat met onze nieuwe zelfgebouwde STM Dome gemeten is. Dit materiaal is een goede geleider waarin de elektronen gecorreleerd zijn, en heeft goed gedefinieerde quasideeltjes. De quasideeltjes worden verstrooid door atomaire defecten in het materiaal, en vormen een interferentiepatroon in de toestandsdichtheid. Met STM maken we een beeld van het interferentiepatroon, en door Fouriertransformatie van deze beelden krijgen we informatie over de elektronische bandstructuur in de impulsruimte. We vergelijken onze STM data met ARPES data op hetzelfde preparaat. In het algemeen vinden we een goede overeenkomst tussen de twee technieken, maar er zijn kleine verschillen tussen de Fermi-snelheden. Deze verschillen zouden door artefacten van de technieken veroorzaakt kunnen worden, maar zouden ook op een fundamenteel verschil tussen de technieken kunnen duiden. We denken dat het belangrijk is om de oorzaak van de verschillen te vinden, maar om dat beter te bestuderen zijn verdere metingen nodig.

Ten slotte stellen we in hoofdstuk 7 drie experimenten voor die in de toekomst met Dome gedaan kunnen worden: het bestuderen van de vreemde-metaalfase in de cupraten, ruis-spectroscopie op sterk gecorreleerde elektronensystemen en de studie van de supergeleidingsfase van cupraten als we deze met microgolven exciteren.

