



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Probing quantum materials with novel scanning tunneling microscopy techniques

Bastiaans, K.M.

Citation

Bastiaans, K. M. (2019, December 10). *Probing quantum materials with novel scanning tunneling microscopy techniques*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/81815>

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/1887/81815>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/81815> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Bastiaans, K.M.

Title: Probing quantum materials with novel scanning tunneling microscopy techniques

Issue Date: 2019-12-10

Samenvatting

Dit proefschrift beschrijft het onderzoek naar zogenoemde kwantummaterie gerealiseerd in elektronensystemen in een vaste stof. Het denkbeeld dat de elektronische fasetoestand van het materiaal in essentie niet hetzelfde hoeft te zijn als die van de vaste stof, zodat beide beschouwd kunnen worden als afzonderlijke eigenschappen van het materiaal, vormt hierbij een inspiratiebron. Bijvoorbeeld voor de meeste simpele metalen (een vaste stof) beschrijven we de elektronische eigenschappen aan de hand van een vloeibare of gasvormige elektronische fasetoestand. Dit is mogelijk omdat de afstotende Coulombkracht tussen de elektronen in het materiaal dermate klein is dat we de elektronen als nagenoeg onafhankelijk van elkaar kunnen beschouwen. Maar hoe zit het met materialen waar de interacties tussen de elektronen niet te verwaarlozen is? Hierbij betreden we het rijk der *kwantummaterialen*. Hier houdt het beeld van de onafhankelijke elektronen geen stand meer; de onderlinge krachten worden zo sterk dat de elektronen en daarmee het gehele elektronische systeem *sterk gecorreleerd* wordt. Dit heeft als gevolg dat het collectieve gedrag van alle elektronen de algemene elektronische eigenschappen van het materiaal gaat dicteren. Het fascinerende is dat vanuit deze microscopische brei van sterk gecorreleerde elektronen macroscopische eigenschappen kunnen oprijzen die van nature kwantummechanisch van aard zijn.

Omdat de meeste van deze emergente - een verschijnsel waar het geheel groter lijkt te zijn dan de som der delen - toestanden complexe eigenschappen bezitten, willen we zowel de microscopische details als de drijvende kracht van de emergentie begrijpen. Omdat er hierbij een samenspel lijkt te zijn tussen de elektronische en atomaire structuur van het materiaal maken we in dit proefschrift gebruik van een experimentele techniek die ons in staat stelt om beide te visualiseren op de atomaire schaal. We bouwen voort op de meest geavanceerde methodes en voegen nieuwe technieken toe die ons in staat stellen om het onbekende terrein van de kwantummaterie in sterk gecorreleerde materialen verder te verkennen.

In hoofdstuk 2 van dit proefschrift beschrijven we de ontwikkeling van een nieuw soort microscoop die wij de 'scanning tunneling noise microscope' dopen. Deze techniek is geïnspireerd op de woorden van Rolf Landauer "De ruis is het signaal", waarmee hij bedoelt dat de fluctuaties in de tijd van een meting een bron van informatie is die niet toegankelijk is in de tijdgemiddelde waarde van de meting.

Onze microscoop is opgebouwd uit een scherpe, geleidende naald die we in 'tunnelcontact' brengen met het te bestuderen materiaal. De elektronen die dan kunnen stromen in dit contact volgen een Poissonproces, wat inhoudt dat de elektronen onafhankelijk en op volkomen willekeurige momenten in de tijd overstappen tussen naald en materiaal. De netto som aan lading die per tijdseenheid wordt overgedragen is wat we beschouwen als de (tijdsgemiddelde) stroomsterkte. De standaardafwijking van dit gemiddelde is wat we verstaan onder de ruis. De stroomruis in een tunnelcontact ontstaat door het feit dat de stroming van ladingsdragers discreet is, bestaand uit kleine ladingspakketjes: de elektronen. In hoofdstuk 2 beschrijven wij de ontwikkeling van een nieuwe voorversterker, die wij kunnen gebruiken om de stroomruis in het tunnelcontact te meten. We demonstreren de unieke prestaties van deze versterker door deze uitgebreid te testen op een metallisch materiaal.

In hoofdstuk 3 gebruiken wij deze nieuw 'scanning noise' microscoop om een koper-oxidaat, een kwantum materiaal waar de sterke correlaties tussen de ladingsdragers leiden tot supergeleiding met een relatief hoge transitietemperatuur, te verkennen. Hierbij ontdekken we atomaire 'hotspots' waar de stroomruis fluctuaties laat zien die tot wel 40 keer groter zijn dan de verwachte waarde voor ongecorrleerde systemen. Door deze ontdekking te combineren met de reeds bestaande onderzoeksmethodes kunnen we deze atomaire ruispunten correleren met de elektronische en atomaire structuur. Uit deze vergelijking kunnen wij concluderen dat deze ruispunten toe te schrijven zijn aan lokale invang van ladingen in het materiaal. De resultaten gepresenteerd in dit hoofdstuk schetsen een nieuw beeld van hoe men naar deze materialen moet kijken: een atomaire stapeling van metallische lagen gescheiden door polarizeerbare isolerende lagen, leidend tot een driedimensionale supergeleidende toestand.

De tweede nieuwe techniek waar we gebruik van maken in dit proefschrift is gebaseerd op het *Josephson* effect. Door een supergeleidende naald in contact te brengen met een supergeleidend materiaal koppelen we twee supergeleidende macroscopische objecten door een dunne isolerende vacuumbarière. Op deze manier creëren we een scanbare Josephsonjunctie. De tunnelstroom kan nu naast enkele elementaire ladingen ook door gepaarde (supergeleidende) ladingen gedragen worden. Deze gepaarde ladingen geven directe toegang tot het supergeleidende condensaat in het materiaal.

In hoofdstuk 4 combineren we onze 'scanning noise' microscoop met deze 'Josephson' techniek. We visualiseren de stroomruis met atomaire resolutie op een supergeleidend Pb(111) oppervlak door gebruik te maken van een supergeleidende Pb naald. Door de stroomruis te meten als functie van de spanning over de junctie laten we zien dat er een transitie plaatsvindt van transport van enkele elementaire ladingen buiten het supergeleidende regime naar transport van gepaarde ladingen binnen het supergeleidende energiebereik. Dit tonen we aan door de verdubbeling in de

stroomruis als gevolg van het paren van de ladingsdragers te meten en ook ruimtelijk in kaart te brengen op het Pb(111) oppervlak.

We gebruiken deze 'Josephson Scanning Tunneling Microscoop' ook in hoofdstuk 5 om de sterk inhomogene aard van het supergeleidende condensaat in een ijzergebaseerde supergeleider te visualiseren. Voorafgaand aan dit onderzoek werd er al gespeculeerd dat het supergeleidende condensaat in deze materialen ruimtelijk sterk zou kunnen variëren en nu tonen wij dit experimenteel aan met atomaire resolutie. Door tegelijkertijd ook de topografische en elektronische eigenschappen van dit materiaal te meten, ontdekken we dat de inhomogeniteit in het supergeleidende condensaat gecorreleerd is met de coherentie van de quasi-deeltjes. Dit impliceert dat supergeleiding nodig lijkt te zijn voor coherente quasi-deeltjes, lokaal, op de lengteschaal van de supergeleidende paring van elektronen.

In het laatste hoofdstuk van dit proefschrift, hoofdstuk 6, visualiseren we de elektronische eigenschappen van het iridaat Sr_2IrO_4 , een kwantum materiaal waar door de sterke correlaties tussen de elektronen de ladingsdragers niet vrij door het materiaal kunnen bewegen. Doordat de elektronen als het ware 'vastgevroren' zitten op de atomaire positie gedraagt dit materiaal zich als een elektrische isolator (een zogenoemde Mott-isolator). Wij meten de lokale elektronische eigenschappen van dit materiaal terwijl het een overgang ondergaat van de vaste 'Mott'-toestand naar de 'pseudogap' toestand. We laten zien dat wanneer er extra ladingsdragers worden toegevoegd aan het materiaal er een fase-gesepareerde toestand ontstaat samen met emergente elektronische structurering op atomaire lengteschaal. Hoewel er weinig chemische overeenkomsten zijn, observeren we wel dezelfde fysische effecten als in de koperoxide hoge-temperatuur supergeleiders. Daarom beschouwen wij deze verschijnselen als algemene eigenschappen van gedoopte Mott-isolatoren, onafhankelijk van hun chemische samenstelling.