

Haar van zwarte gaten en het wezen van hoge-temperatuur supergeleiding

Het lijkt er op dat de snaartheorie eindelijk, na veertig jaar, tenminste één natuurkundige betekenis heeft gevonden. En wel in koperroest, een materiaal dat al 25 jaar berucht is vanwege het mysterie van supergeleiding bij hoge temperaturen. Volkomen onverwacht blijkt snaartheorie nu het quantumgedrag van elektronen in koperroest te kunnen verklaren. Jan Zaenen

Deze ontwikkeling blaast nieuw leven in het relativistische gedachtegoed van de jaren zeventig. Stephen Hawking vond toen uit dat een zwart gat, beschreven door de algemene relativiteitstheorie als een zuivere vervorming van de ruimtetijd, zich in combinatie met quantumveldentheorie gaat gedragen als een gloeilamp. Met de straling van zwarte gaten in de moderne snaartheorie is er echter nog veel meer te beleven. De claim is dat de geheimzinnige 'quantumkritische toestand', 'zwarte-Fermivloeistoftoestand' en 'hoge-temperatuur supergeleidende' toestand van de gecondenseerde-materiefysica precies overeenkomen met de gedragingen van zogenaamde 'harige' zwarte ga-

ten. Tot voor kort werd aangenomen dat zwarte gaten zich gedragen als elementaire deeltjes: ze dragen een massa, lading en impulsmoment, maar verder niets – 'geen haar'. De zwarte gaten zijn volgens moderne inzichten veel kleurrijker. Ze worden omringd door waarschijnlijkheidswolken van quantummechanische, elektronachtige excitaties en een atmosfeer van laserachtig licht. Deze 'kapsels' van het zwarte gat blijken op hun beurt informatie te bevatten over het gedrag van de elektronische quantummaterie zoals dat in aardse laboratoria onderzocht wordt in alledaagse stukjes vaste stof.

Hoge kritische temperatuur

In 1986 werd de rust in het onderzoek aan de supergeleiding ruw doorbroken door de ontdekking van koperoxides waarin supergeleiding optreedt bij temperaturen tot wel 150 kelvin. De roostervibraties die volgens de klassiek geworden Bardeen-Cooper-Schrieffer-theorie verantwoordelijk zijn voor het ontstaan van supergeleiding, geven het op rond de 40 kelvin, en het was gelijk duidelijk dat er iets heel nieuws aan de hand was. Nadat de hype van de hoge kritische temperatuur (T_c) uitgewoerd was, bleek de theoretische beschrijving een nog veel dieper probleem te zijn dan eerst

werd gedacht [1]. Het mysterie van de hoge-temperatuur supergeleiding heeft sindsdien steeds weer een inspiratie gevormd voor grootscheepse innovaties in de experimentele vastestoffysica. Nieuwe materialen werden ontdekt en zo kregen de koperoxides gezelschap van onder meer de 'zwarefermionsupergeleiders' en recentelijk de ijzerpnictides. Daarnaast werd er spectaculaire vooruitgang geboekt met innovatieve experimentele technieken: *Nature* en *Science* stonden de afgelopen jaren vol met resultaten van foto-emissie, neutronenverstrooiing, scanningtunnelingspectroscopie, enzovoorts. Hoe meer we echter te weten kwamen over de gedragingen van de elektronen in deze materialen, hoe duidelijker het werd dat de beschikbare theorieën te kort schoten. Theoretici staan al sinds jaar en dag aan de zijlijn door het ontbreken van vergelijkingen die een verschil kunnen maken.

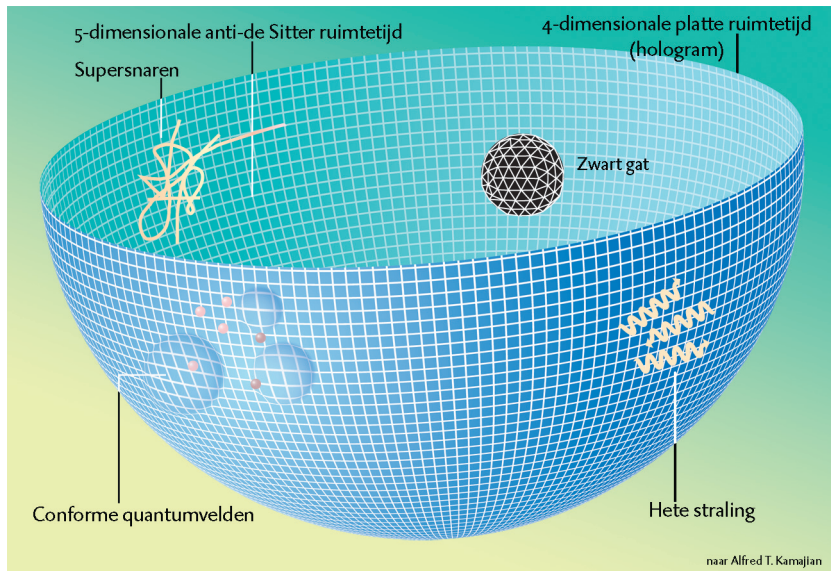
Quantumfaseovergang

Maar nu lijken we te weten waar we de wiskundige verklaring moeten zoeken. De experimenten suggereren dat de meest stabiele supergeleiding optreedt als het elektronensysteem zich in de buurt van een quantumfaseovergang bevindt. Net als in het geval van een thermische continue faseovergang genereert het systeem schaalinvariantie op het punt waar

Koos Gubbels studeerde in 2006 cum laude af in de theoretische natuurkunde aan de RUN. Onder begeleiding van Henk Stoof promoveerde hij in januari 2010 cum laude aan de UU op de theoretische beschrijving van ultrakoude Fermi-gassen. Nu is hij postdoctoraal onderzoeker naar koude molecuulbotsingen in een samenwerkingsverband tussen het FHI te Berlijn en het IMM te Nijmegen.



koosgubbels@gmail.com



Figuur 1 Onderschrift nog nodig (figuur naar Alfred T. Kamajian).

het overgaat van de ene naar de andere fase. Een quantumfaseovergang vindt plaats bij temperatuur nul, en de quantumfysica wordt op dit quantumkritische punt dus schaalinvariant. Het diepe probleem voor de theoretici is dat dit hand in hand gaat met veeldeeltjesquantumverstrengelingen die hun oorsprong vinden in de Fermi-Dirac-statistiek [2]. Vanwege het zogeheten ‘fermiontekenprobleem’ kan die verstrengeling niet beschreven worden met bestaande quantumveldentheoretische en statistisch fysische methoden. De vreemdheid van de fermionische quantumkritische toestand manifesteert zich in het laboratorium vooral in de mysterieuze eigenschappen van de metallische toestand bij temperaturen boven de supergeleidende overgang, wat daarom ook een ‘vreemd metaal’ wordt genoemd.

Op zoek naar vragen

Wat heeft dit allemaal met snaartheorie van doen? Snaartheorie is wonderbaarlijk mooi, maar ook erg geheimzinnig. Het is een samenhangende verzameling van diepe wiskundige vindingen geïnspireerd op fysische motieven. Hoewel de theorie in een recent verleden helaas misbruikt is voor mediagenieke kosmologische filosofieën, is haar huidige status treffend samengevat door het credo: “Snaartheorie is een theorie van (wiskundige) antwoorden op zoek naar (fysische) vragen.” Haar voorlopige hoogtepunt is de zogenaamde ‘Anti-de-Sitter/Conformal-Field-Theory-correspondentie’ (AdS/CFT), ontdekt door Maldacena in 1997. Achter dit zeer sterke wis-

kundige vermoeden steekt een lang en ingewikkeld snaartheoretisch verhaal dat de lezer niet hoeft te weten om te waarderen hoe het werkt [3]. AdS/CFT laat zien dat onder bepaalde voorwaarden Einsteins klassieke gravitationele theorie en sterk gekoppelde quantumveldentheorie letterlijk twee kanten van dezelfde fysische medaille zijn. Preciezer uitgedrukt: het is een machtige dualiteit. Vergelijk het met de vertrouwde deeltje-golfdualiteit die uitdrukt dat er geen verschil is tussen de ruimtekant (deeltje) of de impuls-kant (golf) van de Fourier-transformatie. Maar AdS/CFT is een dualiteit met turbo’s en compressors: het weet alles af van ‘t Hoofts ‘holografische principe’ dat voorschrijft dat gravitationele fysica in een $D+1$ -dimensionale ruimtetijd beschreven kan worden met een quantumveldentheorie die leeft in een D -dimensionale vlakke ruimtetijd. De AdS/CFT correspondentie verbindt deze holografie met principes van de renormalisatiegroepentheorie en de uitkomst is een generalisatie van de fameuze Wilson-Fisher-renormalisatiegroepentheorie die conventionele kritische toestanden beschrijft. Conforme-veldentheorie is een precieze manier om te zeggen dat de quantumveldentheorie schaalinvariant is: het is daarom de mathematische theorie van quantumkritikaliteit. De quantumkritische toestand correspondeert aan de gravitationele kant met een ruimtetijd met een Anti-de-Sitter-metriek, wat een universum met negatieve kosmologische constante oplevert (zie figuur 1). Het blijkt dat de buitenste regionen van de AdS-ruim-

tetijd verbonden zijn met de kortaafstands-fysica (UV) van de CFT-kant en om de correspondentie te laten werken is schaalinvariant noodzakelijk. Het midden van de AdS-ruimtetijd komt overeen met de langeafstands-fysica (IR) van de veldentheorie, en de correspondentie geeft alle vrijheid om afwijkingen van de kritische toestand te bestuderen. Hierdoor kunnen de stabiele toestanden van de veldentheorie die als het ware ‘geboren worden’ uit de sterk wisselwerkende quantumkritische materie in kaart gebracht worden, waarbij de gravitationele correspondent van deze toestanden ‘harige’ zwarte gaten zijn die in het midden van AdS-ruimtetijd leven.

Quark-gluonplasma

De realisatie dat AdS/CFT met de natuur te maken kan hebben, begon in een heel andere tak van de natuurkunde: het onderzoek aan het quark-gluonplasma uitgevoerd door de RHIC-versneller in Brookhaven. Het komt er kort samengevat op neer [4] dat rond 2005 duidelijk werd dat het quarkgluonplasma zich tegen alle verwachtingen in gedraagt als een perfecte vloeistof. Het plasma wordt namelijk gekarakteriseerd door een minimale verhouding tussen de viscositeit en de entropiedichtheid, uitgedrukt in fundamentele natuurconstanten door . Het bleek dat deze fundamentele ondergrens aan de viscositeit al in 2002 voorspeld was op basis van de AdS/CFT-correspondentie! Bij de temperaturen die gerealiseerd worden in de experimenten, gedraagt het sterk wisselwerkende quark-gluonplasma zich nagenoeg quantumkritisch. Met AdS/CFT was het al sinds jaar en dag bekend hoe de eindigtemperatuur-fysica van de conforme quantumvelden op gravitationeel niveau beschreven kan worden: de temperatuur doorbreekt de quantschaalinvariantie en haar gravitationele partner is een ouderwets ‘kaal’ Schwarzschild-zwart-gat in het midden van AdS-ruimtetijd.

Holografische codering

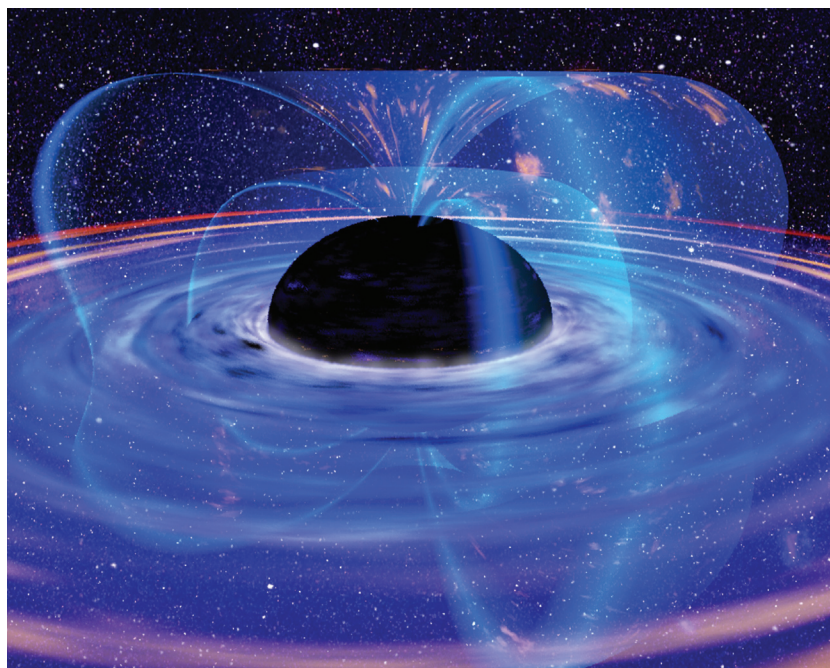
Na dit eerste contact tussen de AdS/CFT-correspondentie en de fysische werkelijkheid [5], heeft de theorie zich alweer verder ontwikkeld. Zo weten we nu dat de eindige dichtheid van materie holografisch gecodeerd wordt in de vorm van een elektrische lading van het zwarte gat. Het resulteren-

de Reissner-Nordström-zwarte-gat (RN) in AdS is heel speciaal. Hoewel de oorspronkelijke schaalinvariantie doorbroken wordt door de chemische potentiaal, blijkt de geometrie in de buurt van de horizon van dit zwarte gat gekarakteriseerd door een opduikende Anti-de-Sitter-geometrie. Dit zorgt voor een uiterst onconventionele vorm van emergente quantumkriticiteit in de veldentheorie: in ruimtelijk opzicht is de quantumvloeistof ‘bevroren’, maar langs de tijdas is het volop quantumkritisch, een toestand die niet voorstelbaar is in het kader van de Wilson-Fisher-renormalisatiegroep. Door golven van fermionen af te sturen op de horizon kunnen foto-emissie-experimenten gesimuleerd worden met AdS/CFT [6]. En wat blijkt? De geladen zwarte gaten bevatten informatie over specifieke fermionische quantumkritische toestanden, die nog altijd gekarakteriseerd worden door Fermi-oppervlakken terwijl de quasideeltjes in de Fermi-vloeistof vervangen zijn door puur temporele quantumkritische fluctuaties [7]. Sinds jaar en dag wordt dit soort gedrag waargenomen met echte foto-emissie-experimenten in de quantumkritische metalen zoals in de hoge- T_c -cupraten.

Dit is nog niet het einde van het verhaal. De quantumkritische RN-duale toestanden blijken extreem onstabiel te zijn. Hun grondtoestand heeft een eindige entropie en het is bekend van klassieke gefrustrateerde systemen dat het dan niet te vermijden is dat een stabiele toestand het zal overnemen bij voldoende lage temperatuur. De gravitationele kant weet hier op haar beurt weer alles van. De correspondentie schrijft voor dat we moeten toelaten dat de ‘huid’ van het geladen zwarte gat in AdS ‘haar’ mag krijgen.

H³-werk

De precieze codering van niet-quantumkritische fermionische materie, in het bijzonder van de Fermi-vloeistof, is op dit moment nog onderwerp van debat [8]. Maar zoveel is duidelijk dat het zwarte gat zich zal aankleden met een quantummechanische waarschijnlijkheidswolk van geladen fermionen. De holografische beschrijving van supergeleiding is daarentegen wel geheel duidelijk. Het avontuur met het ‘harige zwarte gat’ begon namelijk in 2008 met het ondertussen



Figuur 1 Artistieke impressie van een zwart gat (credits: NASA).

legendarische ‘H³-werk’ [9]. De correspondentie laat alle vrijheid om aan de veldentheoriezijde de fermionen te laten paren in bosonische materie, wat aan de kant van de AdS-ruimtetijd gecodeerd wordt in het ‘haar’ van het zwarte gat. Dit ‘haar’ is in essentie laserlicht. Vanwege het zogenaamde superradiance-mechanisme blijkt het geladen zwarte gat zich namelijk automatisch aan te kleden met een atmosfeer van laserlicht als haar Hawking-temperatuur laag genoeg wordt. Dit ‘laserhaar’ rondom het zwarte gat laat zich direct vertalen in een supergeleidende toestand aan de veldentheoretische kant.

Binnen het gecondenseerde-materie-onderzoek vertelt dit een heel nieuw verhaal over de oorsprong van supergeleiding bij hoge temperatuur. De quantumkritische metallische fase is vanwege de eindige fermiondichtheid van een heel nieuw soort, gekarakteriseerd door temporele kritische quantumfluctuaties rondom een Fermi-oppervlak. De thermodynamische instabiliteit van dit metaal neemt toe met afnemende temperatuur, tot het punt dat het de uitweg vindt in een stabiele quantumtoestand: de holografische supergeleider. De supergeleiding vindt haar oorsprong in de ‘dodelijke ziekte’ van haar concurrent (het metaal) en kan daarom de zaak overnemen bij een onredelijk hoge temperatuur.

Geïnspireerd op empirische motieven bleek deze gedachte al een lange tijd

half bewust rond te zweven in de gecondenseerde-materiegemeenschap [10]. Het effect van de ‘harige zwarte gaten’ is dat het veel serieuzer genomen wordt en er worden nu pogingen ondernomen om de instabiliteit van de metallische toestand experimenteel te onderzoeken. Dit blijkt verbluffend moeilijk en het is op dit moment zeker nog niet een feit dat de snaartheorie het probleem van hoge- T_c -supergeleiding opgelost heeft. Ik zal mij als gecondenseerde-materietheoreticus die toevallig wat begrijpt van snaartheorie echter een stevige mening veroorloven, waarbij ik een variatie op Einsteins Godsbeeld in het achterhoofd heb: ik kan het me eigenlijk niet voorstellen dat onze lieve Heer deze kans om bloedmooie wiskunde aan het werk te zetten in zijn schepping aan zich voorbij zou laten gaan.

Referenties en noten

- 1 Een recent historisch overzicht: J. Zaenen, arXiv:1012.5461.
- 2 J. Zaenen, *Science* **319** (2008) 1205.
- 3 Zie bijv. J. McGreevy, arXiv:0909.0518 voor een pragmatische introductie.
- 4 Voor een uitvoerige discussie en wat het betekent voor het koude-atomenonderzoek, zie het themanummer van *Physics Today*, mei 2010.
- 5 J. Zaenen, *Nature* **448** (2007) 1000.
- 6 M. Cubrovic, K. Schalm en J. Zaenen, *Science* **325** (2009) 429.
- 7 T. Faulkner et al., *Science* **329** (2010) 1043.
- 8 M. Cubrovic, J. Zaenen and K. Schalm, arXiv:1012.5681.
- 9 S.A. Hartnoll, C.P. Herzog en G.T. Horowitz, *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 031601.
- 10 J. Zaenen, *Nature* **462** (2009) 15.