

Vertaler tussen wiskundige quantum- theorie en experiment

Interview met Charlie Kane

Dinsdagochtend 17 januari. In Veldhoven loopt een gigantische zaal vol met bijna 1800 natuurkundigen die zich dit jaar hebben aangemeld voor Physics@FOM. Ze gaan luisteren naar de eerste plenaire lezing door Charlie Kane over topologische isolatoren en Majorana-fermionen. Misschien is Kane nog niet zo bekend als de andere twee hoofdsprekers van het congres, Alain Aspect en Juan Maldacena, maar hij is een van de grondleggers van het, ook in Nederland, explosief groeiende onderzoeksgebied naar topologische isolatoren. In 2010 ontving hij de Condensed Matter Europhysics Prize en in maart krijgt hij de Oliver E. Buckley Condensed Matter Physics Prize van de American Physical Society voor de theoretische voorspelling van topologische isolatoren, een nieuwe elektronische toestand van de vaste stof, veroorzaakt door het quantum-spin-Hall-effect. Claud Biemans

48

In het februarinummer van het NTvN schreven Marieke Snelder en Alexander Brinkman een helder artikel [1] waarin het principe van topologische isolatoren wordt uitgelegd: het effect dat bepaalde elektrische isolatoren, met een sterke spin-baan-koppeling alleen aan het oppervlak stroom geleiden – met gescheiden geleidingskanalen voor elektronen met spin-up en spin-down. Kane, hoogleraar aan de universiteit van Pennsylvania, stelde in 2005 dat dit quantum-spin-Hall-effect bestaat en dat het kan optreden in grafeen [2]. Een half uur na zijn lezing, als de andere natuurkundigen naar de parallelsessies verdwenen zijn, komt Kane

naar de afgesproken plaats voor het interview, om vol energie nog drie kwartier te vertellen over de achtergronden van zijn werk. Het hoofdstuk grafeen heeft hij inmiddels afgesloten.

“Dat eerste artikel over het quantum-spin-Hall-effect was het enige artikel dat ik ooit schreef over grafeen. Ik had daarvoor jarenlang gewerkt aan koolstofnanobuisjes, die je kunt beschouwen als cilindervormige stukjes opgerold grafeen. Dus ik begreep de fysica van grafeen al voordat het begrip was ingeburgerd. In een poging om iets interessants met grafeen te doen struikelde ik over het quantum-spin-Hall-effect.”

In zijn lezing vertelde Kane al waarom

het effect in grafeen niet was aan te tonen. In de praktijk bleek het in deze verbinding vrij zwak te zijn en alleen op te treden onder experimenteel lastig te realiseren omstandigheden. In 2007 toonde Laurens Molenkamp van de universiteit van Würzburg in Duitsland aan dat een dunne laag van kwik-telluride zich gedroeg als een topologische isolator in twee dimensies. In datzelfde jaar voorspelde Kane dat er ook driedimensionale topologische isolatoren gemaakt kunnen worden [3]. Hij noemde daarbij verbindingen van bismut en antimoon waarin het gevonden kon worden.

Zahid Hasan van Princeton University las het artikel en benaderde zijn colle-



Charlie Kane. Foto: Bram Saeyes.

ga, de fameuze kristallenmaker Robert Cava, die toevallig nog zo'n kristal in een la had liggen. In 2008 konden ze aantonen dat bismut-antimoon zich inderdaad als een driedimensionale topologische isolator gedraagt. Omdat de ontdekking eigenlijk door Kane op een presenteerblaadje was aangebracht, wilden ze zelf iets nieuws bijdragen en gingen ze door met het onderzoek tot ze het effect ook vonden in andere verbindingen: bismut-selenide en bismut-telluride.

Cava vertelde later in een interview dat hij het artikel van Kane zeer opmerkelijk vond. Het komt zelden voor dat een theoreticus precies zegt naar welke stofje moet kijken om een voorspeld effect te vinden. Kane ziet zichzelf dan ook als een vertaler tussen de zeer abstracte wiskundige quantumtheorieën van gecondenseerde materie en de realiteit van de experimenten.

Vies werk

Als de voorspellingen zo helder waren, waarom was de groep van Zahid Hasan dan de enige die in 2007 op het onderwerp dook? Kane lacht hard. "Er waren inderdaad maar weinig mensen geïnteresseerd. De opdracht was dan ook om een kristal te maken met lastige materialen. Niet veel mensen waren in die tijd in staat om dat voor elkaar te krijgen, maar Cava

is een meester in zijn vak. Ik heb wel verschillende mensen benaderd, maar iedereen weigerde om bismut en antimoon te gebruiken en zo hun molecuulbundel-epitaxie-apparatuur (MBE) – voor het maken van kristallen – te verpesten! Als je er eenmaal bismut instopt, krijg je het er namelijk nooit meer uit. Tegenwoordig worden er speciale MBE-kamers gebruikt voor het werken met bismut."

In een artikel in *Physics World* schreef Kane in 2011 dat topologische isolatoren nooit hun eigenschappen verliezen, zelfs niet na een chemische reactie van het oppervlak. Toch vond de Princeton-groep van Zahid Hasan dat de kristallen erg zuiver moeten zijn, anders ontbreekt het quantum-spin-Hall-effect.

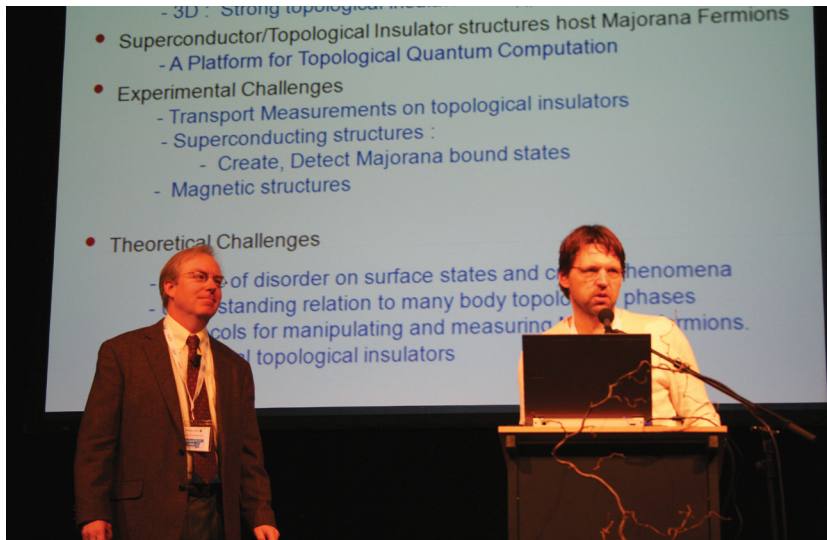
Kane: "Dat klopt inderdaad. Er kunnen een paar dingen fout gaan. Bij te veel wanorde in de bulk wordt de oppervlaktetoestand vernietigd, het Fermi-energieniveau van de oppervlaktetoestand ligt dan niet in de bandkloof van de bulk. Bismut-selenide dat op een natuurlijke manier ontstaat, heeft volgens mij bepaalde geladen defecten. Die zijn de oorzaak van het veranderen van de Fermi-energie van de oppervlaktetoestand. Gewoonlijk wordt deze inherente dotering door kristalmakers gecompenseerd met behulp van een precies afgemeten

kleine hoeveelheid calcium of iets dergelijks. Wanneer de bulk zuiver genoeg is, dan kun je knoeien met het oppervlak zoveel je wilt. Al laat je het oppervlak oxideren, als de bulk in orde is, raak je de oppervlaktetoestanden niet meer kwijt. Daarom zijn topologische isolatoren zo speciaal. Alleen als het oppervlak op een of andere manier magnetisch wordt, dan wordt de tijdomkeringsymmetrie verbroken en verdwijnt de geleidende toestand."

Waar is Majorana?

De belangstelling voor de mogelijke toepassingen van topologische isolatoren is enorm. De oppervlaktetoestanden geleiden elektronen, maar als je een magneetveld aanlegt of je een magnetische verstoring aanbrengt, kan de geleider veranderen in een isolator. Zo zou je een schakelaar kunnen ontwerpen die reageert op een magneetveld. Maar het zijn vooral de voorspellingen over het optreden van Majorana-fermionen – quasideeltjes die hun eigen antideeltje zijn – die tot de verbeelding spreken.

Kane: "Iedereen is daarnaar op zoek, met behulp van, óf zonder topologische isolatoren. De topologische isolator heeft bij de zoektocht naar Majorana-fermionen bepaalde voordelen. Je hebt maar twee materialen



Charlie Kane (links) wordt op Physics@FOM aangekondigd door Leo Kouwenhoven. Foto Claud Biemans.

nodig, een topologische isolator en een supergeleider. Je kunt ook een supergeleider combineren met een halfgeleider, maar dan heb je ook een bron van magnetisme nodig. Velen zijn echter gewend om te werken met halfgeleiders en niet met topologische isolatoren. De tientallen jaren ervaring met GaAs-technologie zijn niet snel te evenaren.

Topologische isolatoren gedragen zich ook niet op de manier zoals ze idealiter zouden moeten doen, als perfecte isolatoren in de bulk. In werkelijkheid geleiden ze wel enigszins. Zou je de voorspelde Majorana-fermionen willen gebruiken als geheugen voor quantumcomputing, dan is dat een probleem. Maar ik denk dat er ruimte is voor verbeteringen. Als we net zo ons best doen voor BiSe als we deden voor silicium, dan gaat er natuurlijk een wereld open. Er moet natuurlijk wel een goede reden zijn om daarmee te beginnen.

Berlijk gezegd kun je geen universele quantumcomputer maken met alleen Majorana-toestanden. Majorana geeft je een soort van geheugen, ze helpen je informatie op te slaan in twee gebonden toestanden die samen een qubit vormen en die twee toestanden kunnen zich op verschillende plaatsen bevinden. Als je een toestand lokaal meet, ken je nog niet de toestand van de qubit, dus de informatie is beschermd tegen lokale metingen. Je moet echter ook in staat zijn om een serie bewerkingen uit te voeren en dat lukt niet door het louter opwekken van Majorana's. De bewerkingen kunnen niet plaatsvinden onder dezelfde

topologische bescherming als die van de Majorana-toestanden. Dat wordt een bron van fouten en die zul je moeten corrigeren.”

In een gewone supergeleider bestaan ook quasideeltjes van elektron-gatparen, die hun eigen antideeltje zijn, maar het ene deeltje heeft een eindige energie en zijn antideeltje dezelfde negatieve energie. In niet-Abelse statistiek hebben beide Majorana-fermionen dezelfde energietoestand nul. Kane denkt niet dat het Majorana-fermion snel gevonden wordt. “Ik denk dat er nog verschillende stappen nodig zijn. Waarschijnlijk zullen we experimenteel eerst indirect bewijs vinden voor het bestaan van het deeltje. Ik denk dat het eerste experiment gericht moet zijn op de bevestiging van het bestaan van de nul-energietoestand. Verder zal er een nul-bias anomalie geobserveerd worden. Maar dan heb je nog niet de niet-triviale eigenschappen aangetoond die een Majorana-fermion zo interessant maken. Uiteindelijk zouden we graag in staat zijn om de niet-lokale eigenschappen van deze objecten te demonstreren. Je wilt zeker weten dat ze in staat zijn om quantuminformatie niet-lokaal op te slaan. Dat is nog veel moeilijker en kan nog wel lang gaan duren. Een eerste aanwijzing zal echter een goede reden zijn om door te gaan met het werk.”

Microsoft financiert het instituut Station Q voor quantumcomputing en het bedrijf is zeer geïnteresseerd in het onderzoek naar topologische isolatoren. Kane: “De zeer gerenomeerde wiskundige en Fieldsmedal-

winnaar Michael Freedman staat aan het hoofd van station Q, dat gevestigd is tegenover het Kavli Institute for theoretical physics in Santa Barbara. Hij is zeer geïnteresseerd in het maken van een quantumcomputer en het instituut steekt veel energie in topologische fenomenen. Ze willen heel graag het Majorana-fermion vinden. Als ze het voor elkaar krijgen zou dat zeer sensationeel zijn. Microsoft kijkt mee over de schouder van dit instituut en het bedrijf ondersteunt ook top-experimentatoren over de hele wereld, zoals Leo Kouwenhoven, die mij vanochtend introduceerde.”

Kouwenhoven is een goede bekende van Charlie Kane. “Leo is een eerste-klas experimentator en ik weet dat hij probeert om met behulp van InAs-quantumdraden Majorana-fermiontoestanden tot stand te brengen. Ik heb ook contact met en veel respect voor de theoreticus Carlo Beenakker. Ik denk dat zijn student Anton Akhmerov het ook helemaal gaat maken in de wereld. Zo zijn er vele Nederlandse fysici waar ik een diep respect voor heb.”

Het gebied van de topologische isolatoren is, net als grafeen, in korte tijd zeer groot geworden binnen de natuurkunde. De eerste Nobelprijs voor onderzoek aan grafeen ging in 2010 naar (tegenwoordig Sir) Andre Geim. Kane is niet iemand die zich waagt aan voorspellingen over een Nobelprijs richting topologische isolatoren. “Daar houd ik me helemaal niet mee bezig” zegt hij. “Wel wil ik zeggen dat het een grote eer is voor mij om een uitnodiging te krijgen voor het geven van deze lezing op Physics@FOM.”

De lezing van Alain Aspect en de Masterclasses door Aspect, Kane en Maldacena tijdens Physics@FOM zijn terug te zien op: www.fom.nl/live/agenda/physicsatFOM/Archives.pag. Een interview met Juan Maldacena zal geplaatst worden in een komend nummer van het NTvN.

Referenties

- 1 Marieke Snelder en Alexander Brinkman, *Topologische isolatoren oppervlakkig bekeken*, NTvN **78-2**, 48 (2012).
- 2 C.L. Kane en E.J. Mele, *Quantum Spin Hall Effect in Graphene*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 226801 (2005).
- 3 Liang Fu en C.L. Kane, *Topological insulators with inversion symmetry*, *Phys. Rev. B* **76**, 045302 (2007).