

'Grafeen kwam echt als een geschenk'

Fysicus **Carlo Beenakker** heeft een nieuw speeltje. Verslaafd aan de puzzels die de natuur hem voorschotelt, bijt hij zich met obsessief fanatisme vast in nieuwe fysica. Sinds een jaar is hij verslingerd aan driedimensionaal grafeen, waarin hij dingen ontdekt die geen mens eerder zag. Ontmoet de man die aan de basis staat van de volgende elektronicarevolutie.

Tekst: George van Hal en Jim Jansen
Fotografie: Bob Bronshoff

Als Carlo Beenakker een beroepsgokker was geweest, was hij inmiddels stinkend rijk. Keer op keer wist de aan de Universiteit Leiden verbonden theoretisch-fysicus veelbelovende nieuwe natuurkundedorbraken vroegtijdig te herkennen en er als een van de eersten mee aan de slag te gaan.

Op die manier kon het bijvoorbeeld gebeuren dat Beenakker vanaf de aftrap betrokken was bij de ontwikkeling van de quantumcomputer. En vlak nadat Nobelprijswinnaars André Geim en Konstantin Novoselov grafeen ontdekten, begon hij al met publiceren over het wondermateriaal. Nog zo'n voorbeeld: Beenakker legde de theoretische basis voor de majoranadeeltjes die de Delftse fysicus Leo Kouwenhoven later in zijn lab bouwde, iets dat Kouwenhoven wel eens de Nobelprijs zou kunnen opleveren.

Je kunt dus gerust stellen dat Beenakker een neus heeft voor natuurkundesucces. Dat maakt het extra opvallend dat juist hij nu weer 'een nieuw ding' heeft, zoals hij het zelf zegt. Sinds afgelopen jaar stort hij zich namelijk vol overgave op zogeheten Weyl-semimetalen: driedimensionale varianten van grafeen waarin vanuit natuurkundig oogpunt heel bijzondere dingen gebeuren.

Beenakker was er ook ditmaal weer als de kippen bij. Terwijl hij met zijn vakgroep in relatieve rust de bijzondere eigenschappen van het spul in kaart bracht, werd ook de

buitenwereld langzaam wakker. Inmiddels bestempelen velen Weyl tot 'het nieuwe grafeen'. Vakblad *Physics World* riep het in 2015 uit tot een van de tien belangrijkste doorbraken van het jaar en sommigen bejubelen het materiaal zelfs als de basis voor een nieuwe elektronicarevolutie. Beenakker waakt voor al te hoge verwachtingen, maar ontdekt onder tussen wel dingen in het materiaal die geen mens eerder zag.

Dit is het bijzondere verhaal van een talentvolle natuurkundige die met zijn bezeten doorzettingsvermogen de fysicawereld keer op keer op zijn grondvesten laat schudden.

Hoe kan het dat u steeds als een van de eersten spannende nieuwe natuurkunde ontdekt?

'Je hebt mensen die na een jaar of tien ergens genoeg van hebben en iets anders gaan doen. Het bestuur, de politiek, het kan van alles zijn. Als je dat doet, ontdek je misschien één keer iets, maar zeker geen tweede keer. Ik heb dat daarom nooit gedaan. Daarnaast moet je ook een beetje mazzel hebben. De onderwerpen moeten zich wel aandienen. En je moet je niet te oud voelen om er weer bovenop te springen.'

'Wie had gedacht dat iets sufs als koolstof nog iets nieuws zou opleveren?'

U hebt het over mazzel. Hebt u dan wel eens op het verkeerde paard gewed?

'Dat niet. Maar ik had rond de eeuwwisseling wel een midlifecrisis. Het was een pessimistische tijd. Het gevoel heerste dat we alles al hadden ontdekt. Dat de eeuw van de natuurkunde achter ons lag. Rond 1900 dacht men overigens precies zo. Het is een soort oudemannenmalaise die je overvalt als de eeuw voorbij is.

'Ik was toen pas veertig, maar ik dacht: ik moet nog wel twintig jaar mee! Iedereen

vertelde me dat als je nog iets wilde betekenen in de wetenschap, je biologie moest gaan doen. Daar zou het gebeuren. Vragen omtrent bewustzijn, grote dingen. Dus ik dacht: ik ben nog niet te oud voor omscholen, ik ga de biologie in. Ik ging naar conferenties, maar daar ontdekte ik dat ik niks kon bijdragen aan dat vak. Ik had totaal niet de juiste *skillset*. Daarom was ik tamelijk somber.

'En toen kwam als een geschenk – zo zie ik het echt – grafeen. Volkomen onverwacht. Wie had gedacht dat zoiets sufs als koolstof nog iets nieuws zou kunnen opleveren? Ik had de mazzel dat ik het in een heel vroeg stadium hoorde. André Geim kwam in Leiden een voordracht houden toen het nog heel pril was. En ik zag meteen: jongens, hier kan ik wat mee! Dus heb ik alles laten vallen en ben ik erbovenop gesprongen.'

Zo werd u dus een van de eersten die onderzoek deed naar grafeen?

'Ja. En het was een heerlijk gevoel, de eerste zijn. Ik wandel weleens in de bergen en zoek daar dan naar aardbeien. Als je een pad bewandelt waar iedereen al geweest is, vind je als je héél goed zoekt, misschien ergens nog wel een verdwaalde aardbei. Maar dan zie je

plotseling ergens in een hoek een plek waar niemand nog is geweest! En ja... dan kun je gewoon grijpen, dan kun je graaien. Zo was het ook met grafeen. Dat was een aardbeienveldje waar nog niemand was geweest. En dan gooi je zo je hele tas vol. Het ging niet eens om *skills*, maar alle anderen waren gewoon nog met iets anders bezig.'

Hoe wist u dan dat grafeen iets heel groots kon worden?

'Het had raakvlakken met dingen die ik in



mijn tijd als onderzoeker bij Philips had gedaan. In grafeen zitten een soort elektronen zonder massa. Dat is heel bijzonder. Verder is het een gewoon tweedimensionaal systeem. Daar had ik ervaring mee, want bij Philips werkte ik tien jaar lang aan tweedimensionale elektronengassen. Systemen waarbij die elektronen wel massa hadden.'

Dus u had een kennisvoorsprong?

'Ja. En dat is eigenlijk de manier waarop ik altijd werk. Mijn kracht ligt niet in compleet nieuwe dingen die geen raakvlak hebben met wat ik doe. Als je me bijvoorbeeld zegt: 'Ga eens aan zwarte gaten werken,' dan zeg

ik: 'Dat vind ik fascinerend, maar ik heb echt geen idee waar ik moet beginnen.'

'Maar het moet ook weer niet helemaal hetzelfde zijn, want dan vind ik het saai. Dus als je zegt: 'We hebben een tweedimensionaal systeem met elektronen,' dan zeg ik: 'Ja, dat ken ik.' Maar als je dan zegt: 'Ze hebben geen massa,' dan wordt het interessant. En voor je het weet heb je twintig artikelen gepubliceerd. Tegen die tijd wordt de rest van de wereld ook wakker, maar dan hebben wij alle simpele dingen al gedaan.'

En dan duikt u vervolgens de diepte in?

'Soms. Ik ben iemand die, zodra het echt

moeilijk wordt, weer iets anders gaat doen. Dan ben ik erop uitgekeken. Grafeenonderzoek trok bijvoorbeeld heel erg richting technologie. Dan vraagt men: 'Kan ik er ook een touchscreen mee maken?' Dat is een heel andere tak van sport, waar ik geen talent voor heb.'

U speelde ook een rol bij de quantumcomputer, die in Delft inmiddels door technisch-natuurkundigen wordt gebouwd. Was dat net zo'n soort proces?

'Dat was heel vergelijkbaar. Ik zat er al vroeg in. Rond 2003, 2004. Van die quantumberekeningen heb ik heel veel plezier gehad. Daar kwamen later de majoranadeeltjes bij, maar zelfs zonder die deeltjes was het onderwerp heel mooi.'

Welke rol speelde u bij de ontwikkeling van die majoranadeeltjes?

'Ik heb één bepaalde schakeling ontworpen. En dat is de schakeling waarmee Leo Kouwenhoven de Nobelprijs gaat winnen, om het kort door de bocht te zeggen. Die schakeling ontwierp ik met mijn studenten. Het is de truc om die majoranadeeltjes te gaan verstrengelen – 'braiden' is de technische term. En de eerste groep die dat voor elkaar krijgt, wint de Nobelprijs. Ik hoop dat dat Kouwenhoven is. Dat is mijn held natuurlijk, daar wed ik op.'

Bent u net als bij grafeen tegenwoordig uitgekeken op de quantumcomputer?

'Nog niet helemaal. Maar wat er bij QuTech gebeurt, dat opschalen van vijf qubits, naar tien qubits, naar duizend qubits... dat vind ik minder boeiend. Het is goed dat ze daar ingenieurs voor hebben. Die werken op een heel andere manier. Ze maken een schema, bepalen wanneer welke taak af moet zijn. Zo bouw je ook een huis: je kunt niet eerst het dak erop zetten, als de muur nog niet af is. Die manier van werken is mij volkomen vreemd.'

U bent nu weer met een nieuw ding bezig dat de wereld kan veranderen. Wat is dat?

'Ik ben op dit moment helemaal gek van Weyl. Dat is driedimensionaal grafeen.

‘Tegen de tijd dat de rest van de wereld wakker wordt, hebben wij alle simpele dingen al gedaan’



is het vaak één van hun dingetjes. Ze hebben werk, ze hebben hun hobby, ze hebben een vriendin, ze hebben vrienden. Ze hebben een hele rits van dingen die ze allemaal belangrijk vinden. Dat werkt niet. Met dit werk moet je elke avond en elk weekend en elk vrij moment bezig zijn. Je kunt best af en toe naar een verjaardag, maar het idee dat je vrijdag om vier uur zegt: ‘Nou tot maandag’, is ondenkbaar. Dan kom je niet verder. Ik probeer daarin zelf het goede voorbeeld te geven. Mijn studenten weten dat ze mij op elk uur van de dag kunnen mailen. Ik werk dag en nacht.’

Toch hebt u ook een gezin.

‘Ja. Ik ben er ook niet trots op dat ik dag en nacht bezig ben. Maar ik weet gewoon: de enige manier om dit te doen, is elk vrij moment eraan denken.’

Dus om drie uur 's nachts kan ik u gewoon skypen met een idee?

‘Nou, dat lijkt me een beetje overdreven. Maar 's avonds en in het weekend en op vakantie wel. Je kunt dit werk een verslaving noemen. Bij mijn kinderen zie ik die werkverslaving niet. Zij denken meer: dit is de baan waar ik voor ga, maar ik heb ook een heleboel andere dingen waar ik voor ga. De manier waarop ik met wetenschap omga, zit niet in hun generatie. Daar is overigens niks mis mee.’

Echt niet? Als ik u goed hoor, denkt u dat die toewijding wel nodig is om succes te hebben in uw vak.

‘Absoluut! Toch zijn er ook andere keuzen in het leven die valide zijn. Maar stel dat je me vraagt wie mijn kinderen zijn in mijn vak, dan zijn dat sommige van mijn promovendi. Met hen trek ik gedurende de vier, vijf jaar dat ze hier zijn dagelijks op. Daar heb ik momenteel een veel intensievere band mee dan met mijn echte kinderen, die niet meer thuis wonen. En diegenen die verder gaan in dit

vak, hebben precies dezelfde toewijding als ik. Er moet gewoon niets anders in het leven zijn dat je liever zou doen dan dit en je moet daar grote offers voor willen brengen in je persoonlijke leven.’

Weer even terug naar uw huidige obsesie. Zijn er weleens momenten dat u de afgelopen tijd niet dacht aan Weyl?

‘Nauwelijks. Ik heb weleens dat ik een hele nacht niet slaap, dat ik erover pieker. Dat is niet per se heel prettig, want je bent de volgende dag moe, maar het is ook niet ónprettig. Je hebt mensen die piekeren over een ziekte, die daar elk moment aan denken. Dat is heel vervelend. Dit lijkt er heel erg op, maar heeft niet dat nare gevoel. Het is iets dat mij obsedeert, waar ik altijd mee bezig ben. De *reward* krijg ik als ik af en toe wat oplos.’

Dan toch maar even die verplichte vraag: is Weyl ook nuttig? Wat kunnen we ermee?

‘Nog niet zo veel.’

Maar u bent er toch enorm enthousiast over?

‘Ja. Ik heb voet aan wal gezet op een nieuw land, waar ik allemaal dingen zie die niemand ooit eerder heeft gezien. En dan kom ik terug, ga ik erover vertellen, en stellen mensen me vragen als: ‘Zijn er daar ook kostbare metalen?’ Dat is de verkeerde vraag. Mijn antwoord is: geen idee. Ik weet het niet. Misschien?’

Toch is de buitenwacht enorm enthousiast. De hypemachine draait op volle toeren. Het heeft dus in elk geval wel een zekere belofte?

‘De belofte van dit soort materialen – Weyl, majorana's en grafeen – is dat ze de basis kunnen vormen van de computer van de 21e eeuw. Op dit moment werken we al vijftig jaar met silicium in de elektronica-industrie.

Het ‘driedimensionale grafeen’ waar Carlo Beenakker aan sleutelt, is opgebouwd uit bijzondere deeltjes waar fysici ruim 85 jaar naar speurden.



Hermann Weyl.
Eth-Bibliothek Z. Rich, Bildarchiv

Deze deeltjes, zogeheten Weyl-fermionen, zijn vernoemd naar de Duitse wis- en natuurkundige Hermann Weyl, die in 1929

voor het eerst voorstelde dat zij mogelijk zouden bestaan. Deze Weyl-deeltjes hebben eigenschappen die sterk lijken op die van elektronen, met één belangrijk verschil: deze bijzondere deeltjes hebben geen massa.

Dat zorgt ervoor dat Weyl-fermionen opmerkelijk gedrag kunnen vertonen. En: nog niemand weet precies wat je ermee kan. Het vermoeden bestaat dat deze deeltjes, en de kristallen waarin ze bij elkaar gestopt zitten, een belangrijke rol kunnen vervullen in toekomstige elektronica. Dat is vanwege de stevige analogie met elektronen geen vreemde gedachte.

Tot 1998 dachten fysici overigens dat Weyl-deeltjes al lang en breed waren

ontdekt. Neutrino's, de ongreepbare deeltjes die elke dag op hoge snelheid door de aarde schieten, leken namelijk keurig aan het profiel te voldoen. Totdat men ontdekte dat neutrino's wel degelijk een (heel kleine) massa hadden, en ze daarmee dus onmogelijk de massaloze Weyl-deeltjes konden zijn.

De zoektocht kwam in een volgende versnelling met de ontdekking van grafeen. Daar in kwamen massaloze fermionen voor die aan alle eigenschappen van Weyl-deeltjes voldeden, behalve één. Deze fermionen waren niet drie-, maar tweedimensionaal, oftewel ‘plat’.

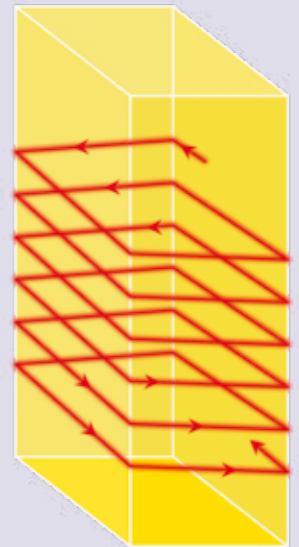
De zoektocht die Weyl in 1929 begon, eindigde in 2015 daarom echt definitief. Toen betrapte een team van fysici, onder leiding van Chinese onderzoekers, driedimensionale Weyl-deeltjes in het semimetaal tantaalaseen. Die vondst werd door vakblad *Physics World* bestempeld tot één van de tien belangrijkste natuurkundedorbraken van het jaar.

In zo'n semimetaal zitten Weyl-deeltjes bij elkaar in een soort kristalstructuur en daarin blijkt het gedrag van die deeltjes (letterlijk) een vreemde wending te kunnen nemen, ontdekte Beenakker. Nadat hij voor het eerst van het bestaan van Weyl-semimetalen hoorde, begon hij zelf te sleutelen aan het goedje. In de eerste publicatie die hij en zijn team deden, kon hij direct opmerkelijk nieuw gedrag van deze mysterieuze fermionen melden. Tegen elke vorm van gezond verstand in bleken

GOOCHELMATERIAAL

Weyl-fermionen in een spiraal om een draad gemaakt van een Weyl-semimetaal te kunnen gaan lopen, zodra je er een magnetisch veld over aanlegde.

Over die bijzondere ontdekking geeft Beenakker nu lezingen voor collega's. Het is fundamenteel gedrag dat geen mens eerder heeft gezien. Het opent de deur naar nog veel meer natuurkundig gegoocheld met dit veelbelovende nieuwe materiaal.



Zodra je een magnetisch veld aanlegt over een draad van een Weyl-semimetaal, lopen Weyl-fermionen in een spiraal eromheen..

Dat werkt nog goed, het kan nog vijftig jaar mee, maar het systeem is wel oud, en op een bepaalde manier ook suf. Iedereen weet dat computers en smartphones mooier worden, maar niet veel sneller. We hebben de verzadiging bereikt.

‘Dan zijn er mensen die zeggen: het is tijd voor iets nieuws. Dat ‘nieuws’ kan één van de materialen zijn waar wij aan werken. Toch is dat niet zo gemakkelijk. We hebben vele miljarden in silicium geïnvesteerd, dus de vraag is of de industrie hier wel op zit te wachten.

‘Neem nu Intel: dat gaf vijftig miljoen aan QuTech in Delft. De reden is dat ze hen de opdracht konden geven om een quantumcomputer met silicium te bouwen. Daarmee deden ze in Delft niets en Intel is niet dom.

Dat heeft honderden miljarden in silicium geïnvesteerd. Quantumtechnologie moet daar dan wel in passen. Halfgeleiders zoals galliumarseen of majoranadeeltjes moeten niet ineens silicium gaan vervangen. Intel wil daarom dat de quantumcomputer past in hun bedrijfsvoering en in hun fabrieken. En in Delft hebben ze de opdracht gekregen om te kijken of dat mogelijk is.’

Is Weyl dan wel een kip met gouden eieren?

‘Van Weyl zeggen veel mensen: het is een revolutie, het gaat de wereld veranderen. Als je iets nieuws hebt, dan hoort dat er nu eenmaal bij. Ik heb daar zelf overigens niks mee. Ik vraag me af: is het interessant? Als het

interessant is, ga ik ermee werken. En als ik gedaan heb wat ik wilde doen, dan is het per definitie niet meer interessant en ga ik iets anders doen.

‘Het fundamentele onderzoek dat wij doen is wel een goede investering. De laser begon ook ooit als iets grappigs, iets fundamenteels. Pas na verloop van tijd zie je de toepassingen. Het is al zo vaak voorgekomen in de fysica dat je iets leuks doet, na tien jaar terugkijkt en denkt: goh, toch wel wat geworden. Dat is geen toeval meer.

‘Investeren in dit soort onderzoek is daarom veiliger dan aandelen kopen. Dat proberen we in Nederland nu te zeggen. Als tegenwicht tegen al die topsectoren, de Nationale Wetenschapsagenda, enzovoorts. Al die

dingen waarbij men ongeduldig is en zegt: ik wil best in jou investeren, maar over vijf jaar wil ik cashen. Dan moet je het gewoon niet doen, dat heeft geen zin. Zo werkt het niet.'

U heeft dus niet zo veel met dat soort maatschappelijke initiatieven?

'Het mooie aan natuurkunde is dat wanneer je problemen oplost, ze over duizend jaar nog steeds zijn opgelost. In de maatschappij komt dat bijna niet voor. In de psychologie had je Freud, maar over zijn ideeën denkt men nu bijvoorbeeld heel anders. Tot voor kort gaf ik hier in Leiden college maxwelltheorie. Meneer Maxwell leefde in 1880 of zo. En dan denk je: jeetje, in Leiden, daar leert men je theorieën uit 1880! Hemelse goedheid, de tijd heeft dus stilgestaan? Ja. De tijd heeft dus stilgestaan. Als je hier over vijfhonderd jaar komt, en we zijn er nog, dan wordt er nog steeds maxwelltheorie onderwezen. Dat is uniek.

'Dan zeg je misschien: ja, maar Maxwell was een grootheid. Maar de dingetjes die ik doe, die van een andere orde zijn wat betreft belang, zijn wel van dezelfde orde van tijdloosheid. Er kan per ongeluk een fout in zitten, maar ze verdwijnen niet omdat de mode of tijdgeest verandert.



'Van Weyl zeggen veel mensen: het is een revolutie. Ik vraag me vooral af: is het interessant?' ◀

Voor uw onderzoek krijgt u veel waardering - prijzen zoals de Spinozapremie, prestigieuze beurzen, lidmaatschap van de KNAW. Kunt u nog een trede hoger?

'Die prijzen zijn natuurlijk prachtig, maar de beloning is iets nieuws vinden. Ik hoop de komende tien jaar nog drie van dat soort dingen te vinden. Dat is tot nog toe ongeveer zeven keer gebeurd - overigens nog best veel. En als ik tussen nu en mijn pensioen nog drie van dat soort ideeën krijg, zou ik dat heel mooi vinden.

'Je hebt het bekende voorbeeld van Albert Einstein, waarbij een journalist op hem afkomt en vraagt: 'Meneer Einstein, waar haalt

u al uw goede ideeën vandaan?' Hij zegt dan: 'Weet ik eigenlijk niet, ik heb er niet meer dan twee of drie gehad.' En dat is ook zo! Alleen: over zijn ideeën hebben we het honderd jaar later nog. Ik zit daar een trede onder, en daarom heb ik tien ideeën.'

Hoop u dat u toch ooit nog tegen een idee van het kaliber Nobelprijs oploopt?

'Het zou kunnen en dat zou mooi zijn. Maar je moet er niet te veel op hopen. Ik las gisteren over de Rembrandt die recent gevonden is. Uit die collectie is er nu nog eentje zoek. Die zul je straks maar vinden! Wat ik daarmee wil zeggen: ik kan best hopen op nog drie mooie ideeën, dat is realistisch. Maar hopen op een idee van Nobelprijskaliber is net zoiets als hopen dat ik morgen dat laatste schilderijtje tegen het lijf loop.' ■