

# Andersonlokalisatie: gefragmenteerd onderzoek aan een universeel verschijnsel

**De voortplanting van golven door wanordelijke materialen is een alledaags verschijnsel: achter de wolken wordt de zon een diffuse vlek en in gehorige huizen zijn de gesprekken van de burens wel te horen maar niet te verstaan. Heel sterk verstrooiende potentialen leiden tot een exponentiële opsluiting van golven. Dit universele fase-overgang-verschijnsel heet Andersonlokalisatie. Onlangs zijn mijn collega's en ik erin geslaagd de essentiële structuur van ultrasonische golven in de buurt van de lokalisatie-overgang te demonstreren. De structuur wordt beschreven door multifractalen. Tijdens het uitvoeren van dit onderzoek, heb ik verschillende standpunten over de beschrijving van dit fenomeen ondervonden en ondertussen veel geleerd over de eigenaardigheden van de communicatie tussen wetenschappelijke sub-gemeenschappen.** Sanli Faez

**N**atuurkundigen doen hun werk op verschillende manieren. Theoretici beginnen vanuit fundamentele relaties om nieuwe verschijnselen te voorspellen of waargenomen fenomenen te verklaren. Experimentatoren willen theorieën toepassen en waarnemingen beschrijven. Men zou verwachten dat theoretici en experimentatoren geïnteresseerd zijn in bevindingen van elkaar en streven naar veel onderlinge interactie. In werkelijkheid is de wetenschappelijke wereld verdeeld en gescheiden door dikke en hoge, soms verborgen, soms merkbare muren. Iedereen die gaat voor

een natuurwetenschappelijke carrière wordt gedwongen om één van de gemeenschappen te selecteren en daarin samen te werken, te wedijveren, en te communiceren. Tijdens mijn onderzoek op het gebied van Andersonlokalisatie ben ik een duidelijk voorbeeld tegen gekomen van deze scheiding tussen gemeenschappen. In dit verhaal zal ik deze ervaringen beschrijven en tergelijktijd mijn onderzoek toelichten.

## **Een doodlopende weg voor golven: Andersonlokalisatie**

Andersonlokalisatie betreft de overgang van geleider naar isolator en is

vernoemd naar Philip Anderson, die dit verschijnsel in 1958 voorspeld heeft in een baanbrekend theoretisch artikel: *Absence of diffusion in certain random lattices*. Anderson werd geïnspireerd door experimenten in de groep van George Feher uitgevoerd bij de beroemde Bell Labs. De spin van elektronen had een zeer lange relaxatietijd in gedoteerde halfgeleiders: elektronen hadden minder last van hun omgeving dan vooraf verwacht. Anderson startte vanuit het perspectief van de elektrische geleidbaarheid van metalen. Het was al bekend dat elektronen niet vrij kunnen bewegen in een metaal. Elektronen botsen niet met elk metaalatom,



**Figuur 1** Philip Anderson.

maar worden voortdurend verstrooid door de onzuiverheden in het rooster. Het pad dat de elektronen afleggen kan worden beschouwd als een wanorderlijke wandeling (diffusie) tussen deze imperfecties. Kortom, hoe meer onzuiverheden, des te kleiner wordt de vrije weglengte en des te lager de geleidbaarheid. Anderson vroeg zich af of een verhoging van wanorde alleen maar zou leiden tot een daling van de gemiddelde vrije weglengte en of er een limiet was. Hij realiseerde het concept van elektronlokalisatie: boven een kritische hoeveelheid onzuiverheden komt de diffuse beweging van het elektron tot stilstand en verdwijnt de geleidbaarheid. In zijn afleiding hield hij rekening met het golfkarakter van de elektronen. Mott, Ioffe en Regel voorspelden later dat de overgang zou plaatsvinden wanneer de vrije weglengte kleiner wordt dan de De Broglie-golf lengte: er is niet veel meer te golven voor een golf wanneer de vrije weglengte korter is geworden dan zijn golf lengte.

Doordat Andersonlokalisatie een golfverschijnsel is, zijn inmiddels vele verschillende gemeenschappen geïnteresseerd geraakt in het verschijnsel: wiskundigen, theoretische natuurkundigen en onderzoekers op

de gebieden van optica, geluid en microgolven bestuderen dit onderwerp. Sterker nog: als wetenschappelijke onderwerpen ooit gesorteerd worden op het aantal afzonderlijke gemeenschappen die eraan werken, dan zal Andersonlokalisatie ergens aan de top van die lijst verschijnen.

### Mijn vertrouwde omgeving: klassieke golven en zelfconsistente theorie

Andersons voorspelling van lokalisatie is slechts in een beperkt aantal gevallen experimenteel waargenomen. In de praktijk overvleugelt de elektron-elektroninteractie de Andersonlokalisatie-effecten. Het meeste begrip betreffende Andersonlokalisatie is dan ook voortgekomen uit theoretisch werk en computersimulaties. Eén van de meest succesvolle beschrijvingen wordt de zelfconsistente theorie genoemd. Deze theorie beschrijft de diffusie met Feynmandiagrammen en neemt ook interferentie-effecten mee, waardoor een klassiek diffusiemodel niet meer opgaat.

Deze ontwikkeling en de experimentele waarnemingen van zwakke lokalisatie van licht in de groepen van Akira Ishimaru, Georg Maret en Ad Lagendijk (mijn promotor) in 1985 hebben de weg gebaad voor een zoektocht naar Andersonlokalisatie met klassieke golven, zoals licht en geluid. Sajeev John had al eerder voorspeld dat er een frequentiebereik zou moeten bestaan waarin elektromagnetische golven gelokaliseerd zijn. De vraag was bij welke frequentie. Door toepassing van de zelfconsistente theorie van elektronlokalisatie op klassieke golven waren Costas Soukoulis, Ping Sheng, en hun collega's in staat om nauwkeurige voorspellingen te doen over waar experimentatoren zouden moeten kijken.

Er zijn overeenkomsten maar ook verschillen tussen elektrongolven en

klassieke golven. Er is een analogie te maken tussen de frequentie van de klassieke golf en de energie van een elektron (zie figuur 2). Klassieke golven bieden bepaalde voordelen voor het bestuderen van lokalisatie. In tegenstelling tot elektronen, hebben fotonen geen interactie met elkaar. De grootste experimentele uitdaging voor klassieke golven ligt in het vinden van structuren met voldoende efficiënte verstrooiing om lokalisatie te krijgen.

### Kijken over de grenzen van mijn subgemeenschap

In de klassieke golven-gemeenschap wordt de zelfconsistente theorie aanvaard als de meest geschikte theorie om de overgang naar lokalisatie te beschrijven. De theorie begint vanuit de diffusiekant van de overgang. Diffusie verklaart 99,9% van de experimenten waarin de voortplanting van licht door wanorderlijke materialen wordt bestudeerd. Elke afwijking van de diffusietheorie wordt beschouwd als zeldzaam en interessant. Alle proefschriften die in onze groep waren verschenen, begonnen dan ook met een hoofdstuk over zelfconsistente theorie. Toch bleven er vragen over lokalisatie die de zelfconsistente theorie niet beantwoordt. De grootte van de lokalisatielengte noch de golfstructuur op en onder de lokalisatie-overgangsdrempel worden voorspeld. Ik besloot om een zomerschool bij te wonen in het eerste jaar van mijn promotie om meer over de theorie van lokalisatie te leren.

De zomer van 2008 viel samen met het 50-jarige bestaan van het baanbrekende artikel van Anderson. Om dat te vieren werd er een zes maanden durend programma georganiseerd door het Isaac Newton instituut voor wiskunde aan de universiteit van Cambridge. Het programma bestond uit een inleidende cursus en meer gespecialiseerde workshops over verschillende lokalisatiefenomenen. De onderwerpen waren relevant. Ik was ervan overtuigd dat Ad me zou aanmoedigen om deel te nemen.

“Dit is te veel wiskundig georiënteerd. Je leert niks van deze mensen dat nuttig is voor je proefschrift,” zei Ad tot mijn verbazing en teleurstelling, terwijl hij bladerde door de lijst van de docenten van het programma. Inderdaad waren er evenveel wiskundigen als natuurkundigen uitgenodigd voor

	Maxwell (Klassieke)	Schrödinger (Quantum)
Golfvergelijking	$[p^2 + \epsilon(\vec{r})\partial_t^2]\psi(\vec{r}, t) = 0$	$[p^2 + V(\vec{r}) - i\partial_t]\psi(\vec{r}, t) = 0$
Potentiaal wanorde	$V_\omega(\vec{r}) = [1 - \epsilon(\vec{r})]\omega^2$	$V(\vec{r})$

**Figuur 2** Gelijkenis tussen quantum en klassieke golfvergelijking in wanordelijke potentialen. De quantum wanordelijke potentiaal wordt bepaald door de atoom-elektroninteractie. Voor de propagatie van licht, een voorbeeld van klassieke golven, wordt de wanorde veroorzaakt door de ruimtelijke variatie van de diëlektrische constante  $\epsilon$ , en de potentiaal is afhankelijk van de frequentie  $\omega$ .



**Figuur 3** De deelnemers aan de eerste Andersonlokalisatie workshop in Cambridge. Bovenste rij: WWWWWTTTWWTTTE, middelste rij: WTWWTWWTTTWTWTW en onderste rij: WTWWTWATWWWT (A: Philip Anderson, E: experimentator, T: theoretisch natuurkundige, W: wiskundige).

het programma. Zelfs de natuurkundigen waren vaak onbekend voor Ad, die al tenminste 25 jaar in het veld werkzaam is! Het was een verhelderend moment toen ik me realiseerde hoe uitgebreid dit onderzoeksgebied was geworden. Ik was tegelijkertijd geschrokken over de verzuiling binnen één onderwerp van de natuurkunde. Ik moest de aanwezigheid van een paar bekende namen benadrukken, waaronder Philip Anderson zelf, om toestemming van Ad te krijgen. Echter niet voordat hij zelf geprobeerd had om een andere conferentie over lokalisatie in datzelfde jaar voor mij uit te zoeken. Deze speurtocht bleek al gauw niet succesvol. Later nam hij zelf het initiatief om een conferentie te organiseren met sprekers die hij beter kende. Ik ging ook naar deze mede door Ad georganiseerde conferentie in Parijs en vond daar slechts twee sprekers die ook deel hadden genomen in Cambridge.

Toen ik begon met de eerste work-

shop in Cambridge was ik bereid om veel nieuwe dingen te horen vanuit verschillende perspectieven. Toch was het moeilijk te verwerken om een vooraanstaand Amerikaans theoretisch fysicus te horen zeggen: "Zelf-consistente theorie [over het overgangspunt] van lokalisatie is fout!" Een belangrijk moment: ik moest nog veel leren. Nu begreep ik waarom de natuurkundigen, aan wie wij refereren in onze publicaties, niet waren uitgenodigd in Cambridge. Een tweede schok volgde de dag erna. Ik kreeg de kans om met Philip Anderson te praten en vroeg hem naar zijn mening over lichtlokalisatie-experimenten. Hij zei zoets als: "mensen uit de lichtgemeenschap hebben vaak de neiging om een sterke claim te maken op basis van weinig aanwijzingen." De boodschap was duidelijk.

### Flirten met de theoretici: multifractalen en verstrooiende golven

Eén van de onderwerpen die het meest mijn aandacht trokken, ging over de zogenoemde multi-fractaliteit van golf functies rond de lokalisatieovergang. Deze multi-fractaliteit beschrijft de heftig fluctuerende ruimtelijke golf patronen die aanwezig zijn rond de lokalisatieovergang. Franz Wegner voorspelde dit verschijnsel in 1980. Ik was zeer geboeid door dit onderwerp, omdat ik me altijd had afgevraagd hoe een gelokaliseerde golf eruit zou zien. Een fractaal is een meetkundige figuur die zelfgelijkend is, dat wil zeggen opgebouwd is uit delen die min of meer gelijkvormig zijn met

de figuur zelf. Hij kan worden gekarakteriseerd door zijn zogenoemde Hausdorff-dimensie: in tegenstelling tot niet-fractale objecten is de dimensie van een fractaal object geen geheel getal. Een multifractaal kan omschreven worden als het overdekken van verschillende fractalen en kan dus worden gekarakteriseerd door een spectrum van Hausdorff-dimensies.

Ik begreep dat het bestuderen van dit fenomeen zeer informatief zou zijn bij experimenten en dat nog niemand experimentele data hierop had geanalyseerd. Ik realiseerde me dat het meten van de golfstructuur gemakkelijker is voor licht dan voor elektronen. Bij terugkomst ging ik onmiddellijk naar Ad. Ik vertelde hem dat ik dit effect wilde meten. Ik dook het lab in en bouwde een opstelling waarmee ik het golfpatroon aan het oppervlak zou kunnen meten. Helaas, zelfs in de sterkst verstrooiende samples die we in het lab hadden bleken de gemeten golf patronen puur diffuus. Een duidelijk bewijs dat wij in ons onderzoek niet de overgangsdrempel hadden bereikt. Deze conclusie is bovendien veel minder ambigu dan in vorige experimenten.

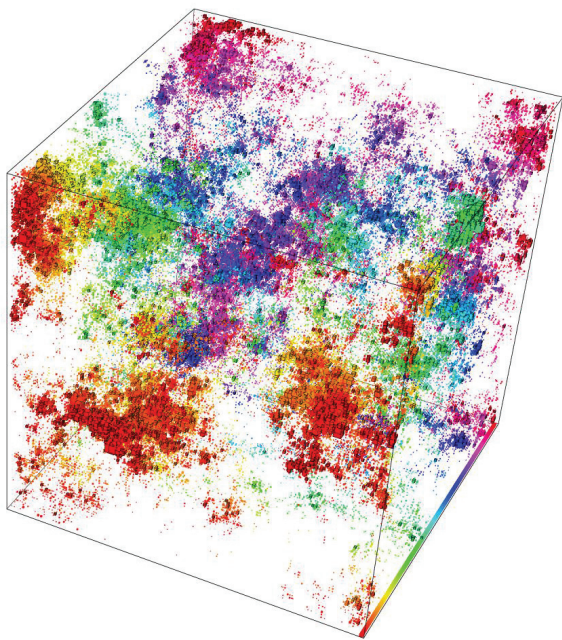
Ondertussen verscheen een nieuw artikel van een Canadees-Frans onderzoeksteam over de experimentele observatie van lokalisatie voor ultrageluidsgolven. Ze hadden de voortplanting van ultrageluid door een structuur gemaakt van wanorderlijk gesoldeerde aluminiumbolletjes bestudeerd. Onder de auteurs zat een bekende naam: Bart van Tiggelen, een voormalige promovendus en een goede vriend van Ad. Ze hadden de golf patronen op het oppervlak van hun samples gemeten. Aanvankelijk was ik nogal jaloers, maar ik realiseerde me dat als ze echt lokalisatie gezien hadden, ze ook multifractaliteit hadden kunnen waarnemen. Het einde van de tweede workshop in Cambridge viel samen met een bezoek van Bart aan onze groep. Ik vertelde Bart over de multifractalen. Hij werd zeer enthousiast en tot mijn aangename verrassing zei hij dat hij onmiddellijk zijn Canadese collega en mede-auteur John Page zou vragen mij data te sturen, zodat ik ze zelf kon analyseren en bekijken of multifractaliteit aangetoond kon worden. Ik gebruikte twee standaard box-telmethode voor de analyse van multifractalen. Mijn

Sanli Faez is als promovendus verbonden aan het Centrum voor Nanofotonica op het FOM-Instituut AMOLF te Amsterdam. In 2005 kwam hij vanuit Iran naar de Universiteit Twente om een master nanotechnologie te volgen. Hij is dol op huis-tuin-en-keuken-experimenten die minder dan 100 euro kosten. Hij schrijft over zijn ervaringen in de wetenschap op de *Survival Blog for Scientists* ([www.sciencesurvivalblog.com](http://www.sciencesurvivalblog.com))

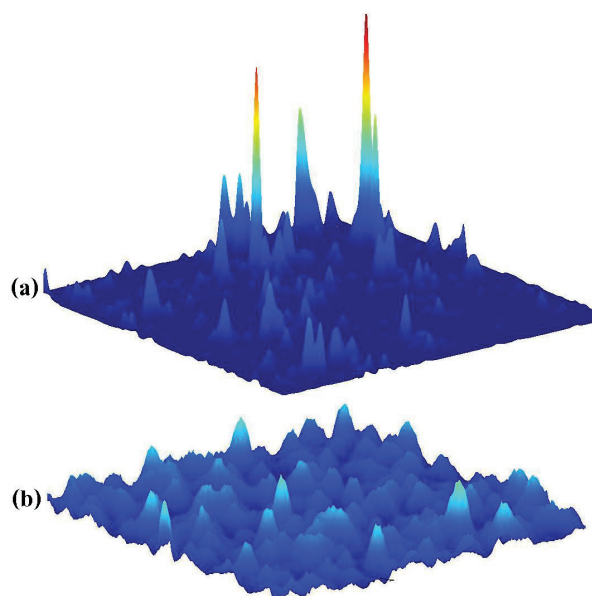


faez@amolf.nl





**Figuur 4** Een berekening van een multi-fractale elektronische golf-functie in drie dimensies. De grootte van de kleine blokjes representeert de grootte van de golf-functie en de kleur staat voor diepte in de kubus. In tegenstelling tot een golf-functie, die diffusie beschrijft, is de intensiteit zeer non-uniform (met dank aan Rudolf Roemer, Universiteit van Warwick).



**Figuur 5** Intensiteit van ultrageluidsgolven gemeten aan het oppervlak van het sample voor a) het gelokaliseerde en b) het diffuse regime. De kleuren geven de intensiteit op elk punt weer genormeerd op het gemiddelde. De fluctuaties zijn veel hoger in het gelokaliseerde regime en tegelijkertijd zijn er grote regio's van stilte (kleine intensiteit) aanwezig.

eerste poging was niet succesvol. De statistieken waren te slecht en ik kon echte informatie niet van ruis onderscheiden.

De derde workshop van het Cambridge-programma werd gehouden op een heuvel in Wales. Tot mijn grote genoegen werden verschillende lezingen gegeven over multifractaliteit. Bijna niemand had het artikel over ultrageluidlokalisatie opgemerkt, terwijl dat artikel al zes maanden online stond voordat het werd geaccepteerd in het prestigieuze tijdschrift *Nature Physics*. Ik liet het artikel zien en de meeste sprekers werden enthousiast. Terug in Amsterdam, en gevoed met nieuwe informatie en inspiratie, vroeg ik om meer data en verbeterde mijn analyse. Ik zag tekenen van multifractaliteit! Meerdere kenmerken zoals symmetrie en paraboliciteit, voorspeld in theorie, werden bevestigd. Ik presenteerde mijn resultaten in de vorm van een poster op de Parijs-conferentie. De zes maanden daarna besteedden we nog meer tijd aan het analyseren van oude data en vergaarden we nieuwe data speciaal op mijn verzoek. De aanwezigheid van multifractaliteit was nu onomstreden. Met de grote hoeveelheid data konden wij zelfs verschillende experimentele condities vergelijken en proberen enkele

afwijkingen ten opzichte van de theorie in onze gegevens te begrijpen.

### Een brug is geslagen

Wij stuurden onze bevindingen op naar *Physical Review Letters* (PRL). In minder dan 24 uur tijd kreeg ik een reactie van de editor van PRL: hij weigerde ons artikel naar referenten te sturen. Ons verslag zou te technisch zijn en de nieuwe fysica zou al gerapporteerd zijn in het *Nature Physics* artikel. Ik was geschokt. Ik was juist heel trots op het feit dat ons artikel niet alleen nieuwe resultaten bevatte, maar ook meer dan één gemeenschap bediende. Met hartverwarmende steun van Ad, Bart en John, besloten we in beroep te gaan. Onze overtuigingskracht werkte. Een onafhankelijke beoordelaar besloot dat het artikel naar referenten moest worden gestuurd. We ontvingen zeer bemoedigende en positieve rapporten van alle referenten, duidelijk geschreven door theoretici, de echte doelgroep van ons werk. Wij waren geslaagd in het helpen overbruggen van de kloof tussen de theoretische en experimentele gemeenschap. Ons artikel werd gepubliceerd in het oktobernummer van PRL. De resultaten zijn zo nieuw en de vooruitzichten zijn zo helder dat ik Ad heb kunnen overtuigen om met een nieuw project in onze groep

te beginnen, dat volledig is gewijd aan dit verschijnsel, wellicht tot aan mijn promotie.

### Nawoord

Wetenschappelijk onderzoek wordt technischer en meer toepassingsgeoriënteerd. Onderzoeksdomeinen worden meer en meer gespecialiseerd en bijna niemand kan zich breed in de wetenschap verdiepen, zoals dat wel mogelijk was in de 19<sup>e</sup> eeuw voor Lord Rayleigh en James Maxwell. De breedte van de huidige wetenschap mag echter geen excuus zijn voor wetenschappers om zich te verbergen in hun oude vertrouwde omgeving. De beslissing om voorbij de grenzen van mijn eigen vakgebied te kijken was voor mij zeer succesvol. Nog belangrijker is voor mij echter dat ik me nu onderdeel voel van een grotere groep fysici. Sindsdien probeer ik open te zijn, te leren van anderen en vooroordelen te voorkomen. Op die manier hoop ik een dergelijke ervaring nog vele malen in mijn carrière mee te mogen maken.

Ik zou graag Ramy El-Dardiry, Wim van der Zande en Ad Lagendijk bedanken voor het kritisch lezen van deze tekst en hun vruchtbare opmerkingen.