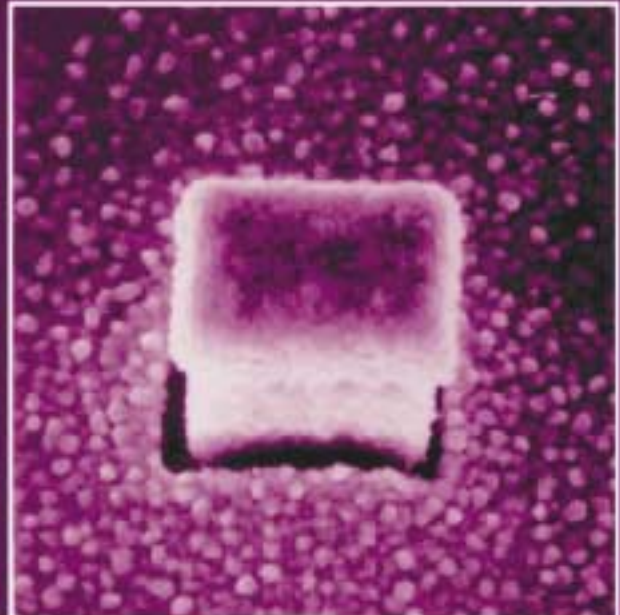


Kondo-effect in



## kwantumdots

# Elektronendans in de ijzige kou

Als kwantumdot kun je geen koukleum zijn. Delftse fysici koelen de dots – ook wel kunstmatige atomen genoemd – tot enkele duizendste graden boven het absolute nulpunt. Daar laat de natuur zich van een van haar meest exotische kanten zien.

In de jaren dertig van de afgelopen eeuw stuitten natuurkundigen op een onverwachte, opmerkelijke eigenschap van metalen. Het was bekend dat wanneer je een zuiver metaal zoals koper of goud afkoelt, de elektrische weerstand afneemt. Dat komt doordat de trillingen van de metaal-atomen afnemen, waardoor de negatief geladen elektronen makkelijker door het rooster kunnen bewegen. Daardoor geleidt het metaal beter elektrische stroom.

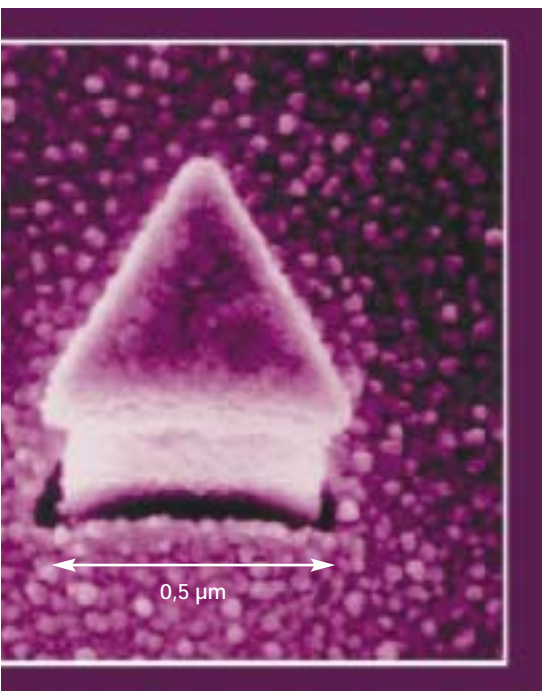
Wanneer zo'n stuk metaal niet helemaal zuiver is maar een kleine concentratie magnetische onzuiverheden bevat (bijvoorbeeld ijzeratomen), treedt een verrassend verschijnsel op. Als we de

elektrische weerstand van dit licht verontreinigde metaal volgen terwijl we dit afkoelen, blijkt dat die eerst afneemt, net zoals bij zuivere metalen. Zo'n tien graden boven het absolute nulpunt neemt de weerstand echter plotseling weer toe, om uiteindelijk bij het absolute nulpunt te verzadigen bij een zekere restwaarde.

Dit verschijnsel heet het Kondo-effect en is vernoemd naar de Japanse theoretisch fysicus Jun Kondo die pas ruim dertig jaar later, in 1964, een verklaring gaf voor dit fenomeen. Kondo's uitleg is gestoeld op de kwantummechanica, de theorie uit het begin van de 20e eeuw die een revolutie heeft teweeggebracht in de natuurkunde.

### Vijvers van elektronen

In Delft onderzoeken we het Kondo-effect ook, hoewel niet bij licht verontreinigde metalen maar in zogenaamde kwantumdots. Kwantumdots zijn zeer kleine gebieden, puntjes (*dots*), in halfgeleidend materiaal, waarin we een 'vijvertje' van elektronen kunnen aanbrengen. Het aantal elektronen in een kwantum-



## Wilfred van der Wiel, Jeroen Elzerman en Leo Kouwenhoven

Technische Universiteit Delft

Ir Wilfred van der Wiel (25) studeerde in 1997 cum laude af in de technische natuurkunde aan de Technische Universiteit Delft. Momenteel werkt hij aan de fysica van kwantumdots in Delft en aan nieuwe kwantumdotstructuren bij NTT Basic Research Laboratories in Japan. Ir Jeroen Elzerman (27) studeerde technische natuurkunde aan de TU Delft, en werkt daar nu als promovendus aan kwantumdots. Hij is vooral geïnteresseerd in de spineigenschappen van elektronen. Prof dr ir Leo Kouwenhoven (37) promoveerde in 1992 aan de TU Delft in de mesoscopische vastestoffysica, die kijkt naar systemen tussen 100 en 10.000 nanometer. Zijn interesse verschuift naar nog kleinere afmetingen: de nano-elektronica.

### Vormen

Drie typen verticale kwantumdots.

dot varieert van één tot een paar duizend, terwijl de afmetingen van zo'n dot enkele nanometers tot micrometers bedragen.

Het onderzoek aan de kwantumdots leidt tot meer inzicht in de handel en wandel van elektronen en hun wisselwerking met de stof waarin ze zich bevinden. Op termijn liggen hier wellicht toepassingen in het verschiet op het gebied van bijvoorbeeld de nanotechnologie, en wellicht kunnen onze kwantumdots ooit de rol spelen van de zogenaamde 'qubits' in een kwantumcomputer. Voorlopig is het ons daar echter niet om te doen en heeft het onderzoek een louter fundamenteel karakter. Dat maakt het echter niet minder interessant – integendeel.

Het aantal elektronen in een kwantumdot is zo laag en de dot zelf is zo klein, dat de elektronen allerlei kwantummechanische eigenaardigheden gaan vertonen. De fysica van de kwantumdots vertoont dan ook vele overeenkomsten met de kwantumsystemen die we tegenkomen in de atoomfysica. Vandaar dat we de kwantumdots de koosnaam 'kunstmatige atomen' hebben gegeven. In tegenstelling tot echte atomen hebben onze dots echter géén kern. Bovendien zijn ze zo'n duizend keer zo groot. Dat is handig, want door die afmeting kunnen we er stroomdraadjes en elektroden aan vastmaken. Met de elektroden 'bespelen' we de dots. We va-

riëren bijvoorbeeld het aantal elektronen in de dot door de elektrische spanning op de elektroden te veranderen.

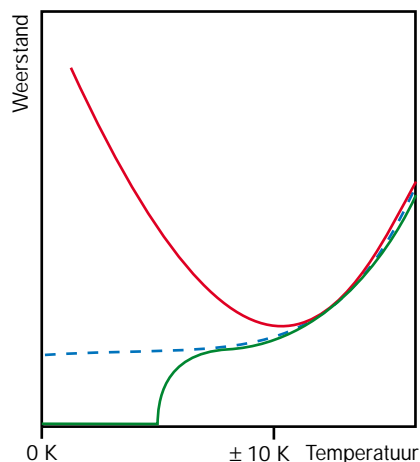
De negatief geladen elektronen in de dot stoten elkaar weliswaar af, maar blijven bij elkaar omdat ze zijn opgesloten in alledrie de ruimtelijke dimensies (zeg x, y en z), min of meer als in een atoom. En net zoals een atoom heeft ook een kwantumdot specifieke energieniveaus, vergelijkbaar met de 'elektronenbanen' in het atoom. De energieniveaus in een kwantumdot bepalen de energie die nodig is om een elektron door de dot te laten bewegen.

De energieniveaus in de kwantumdot verschuiven we door de spanning op een elektrode te variëren. De vrije elektronen buiten de kwantumdot hebben een zekere hoeveelheid energie beschikbaar. Ook in de dot hebben de elektronen een zekere hoeveelheid energie. Dat is enigszins vergelijkbaar met rotsblokken in een kuil, zoals in de tekening op pagina 47. Zolang de energie van de elektronen in de dot (of de kuil) lager is dan in de buitenwereld, vult de dot zich met elektronen. Elk nieuw elektron op de dot wordt echter afgestoten door de andere, zodat de energie van de nieuw toegevoegde elektronen steeds hoger wordt: de kuil raakt vol. Als de diepte van de kuil niet precies past bij de hoogte van de rotsblokken, steken de laatste rotsblokken er bo-

venuit. Er passen dan geen elektronen meer bij. Bovendien blokkeren ze de weg voor andere elektronen. Deze blokkade heet de **Coulomb-blokkade**, omdat hij afkomstig is van de afstotende Coulombkracht tussen de elektronen.

### Kondo-effect

De weerstand van een metaal neemt af met de temperatuur totdat hij verzadigt bij een restwaarde (blauwe streepjeslijn). Sommige metalen worden supergeleidend bij een kritieke temperatuur (groene lijn). In bijvoorbeeld koper met een beetje kobalt neemt de weerstand juist toe bij lage temperaturen (rode lijn). Dat is het Kondo-effect.





Groep C. Schönberger, Universiteit Basel, Zwitserland

### Op een chip

Een chip van  $5 \times 5$  mm die diverse kwantumdots bevat.

Met de spanning op de elektrode variëren we de energie van de elektronen in de kwantumdot: we passen de diepte van de kuil aan. Is die precies afgestemd, dan vullen de laatste elektronen de kuil precies tot aan de rand. Zo maken ze de weg vrij voor andere elektronen om een voor een door de dot heen te springen. Die afgestemde energiehoeveelheid is waarneembaar als we de stroom (heel klein: typisch een miljoenste van een miljoenste ampère) door een kwantumdot meten. Het verschijnsel manifesteert zich in de zogenaamde *Coulomb-oscillaties* (zie de grafiek op pagina 47).

### Niet dezelfde spin

Totnogtoe hebben de kwantumdots niets te maken met het Kondo-effect. We keren daarom even terug naar het Kondo-effect in metalen en de verklaring die de Japanner Kondo daarvoor gaf. Die verklaring draait om een bijzondere eigenschap van het elektron: de *elektronspin*. Het elektron gedraagt zich alsof het om zijn eigen as draait, net zoals de aarde. De richting van de spin hangt samen met de richting van de rotatie. Vanwege die draaiing gedraagt het elektron zich als een kleine magneet, waarbij de richting van het magneetveld samenhangt met de richting van de spin.

De rotaties van een macroscopisch lichaam zoals de aarde kan alle kanten op wijzen. Het kleine elektron behoort

echter de wetten van de kwantummechanica, en die zijn heel anders dan we gewend zijn. Voor onze discussie van het Kondo-effect is het belangrijk dat de elektronspin slechts twee kanten op kan wijzen: omhoog en omlaag. We noemen dat *spin-up* (omhoog) en *spin-down* (omlaag).

Bevat een metaal kleine hoeveelheden magnetische onzuiverheden, dan voelen de elektronen dat. Elektronen zijn immers zelf kleine magneetjes. Zij 'voelen' het magneetveld van de onzuiverheid, die als een krent in de cake zit. Vloeit er een stroom door het metaal, dan stromen de elektronen rond de krenten en worden daarbij verstrooid. Hierbij kan het gebeuren dat de spinrichting van zowel het elektron als het 'krentenatoom' omdraait. Dit heet een *spin-flipverstrooiing*.

Uiteindelijk leidt dit proces van spinflipverstrooiing ertoe dat zich rond de magnetische onzuiverheid een 'wolk' van geleidingselektronen bevindt, die het magneetveld van de magnetische onzuiverheid afschermt. Deze zogenaamde 'Kondowolk' ontstaat bij temperaturen onder de karakteristieke Kondo-temperatuur en leidt tot het ongewone weerstandsgedrag.

### Helemaal omgekeerd

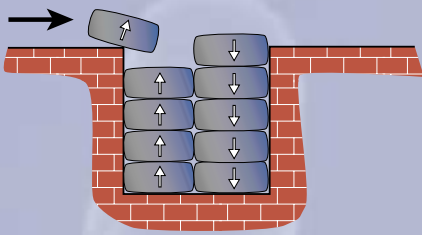
Tot zover het Kondo-effect in metalen. Ook in onze kwantumdots treedt het Kondo-effect op, en het is een aardige illustratie van het feit dat de kwantum-

mechanica tot vreemde gedragingen aanleiding geeft. Het Kondo-effect in onze kwantumdots is namelijk precies het omgekeerde van wat je zou verwachten: terwijl de weerstand van magnetisch onzuivere metalen toeneemt bij dalende temperatuur, neemt die van de kwantumdots juist af door het Kondo-effect.

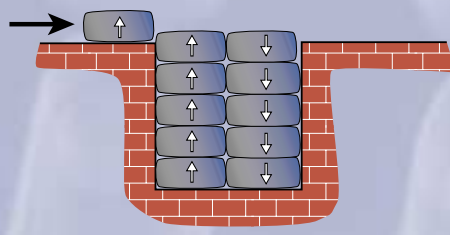
Op het eerste gezicht lijken magnetisch licht verontreinigde metalen en kwantumdots niet zoveel met elkaar te maken te hebben. De overeenkomst is er echter wel. De rol van de verontreiniging, de krent in de cake, wordt in de kwantumdots vervuld door een elektron dat in de dot zit opgesloten. De contacten van de dot (de stroomdraadjes) zijn gevuld met elektronen die vrij kunnen bewegen. De twee basisingrediënten voor het Kondo-effect zijn dus ook aanwezig bij kwantumdots: een vastzittend magneetje en vrije elektronen die hieraan kunnen verstrooien.

Ook na dit verhaal blijft het vreemd dat datzelfde Kondo-effect bij elektrisch transport door kwantumdots juist voor een verlaagde weerstand zorgt. De clou zit hem in de toename van de verstrooiingsprocessen wanneer het Kondo-effect in kwantumdots zich voordoet. In de metalen leidt deze toename van verstrooiing juist tot het bemoeilijken van het elektrontransport en dus tot een toename van de weerstand. In de kwantumdots maakt de extra verstrooiing daarentegen dat de vrije elektronen een grotere kans hebben door de dot heen te springen – dus nu tot een afname van de weerstand. Of het Kondo-effect zich überhaupt voordoet bij een kwantumdot, hangt af van een aantal factoren. Niet elke dot laat het Kondo-effect zien;

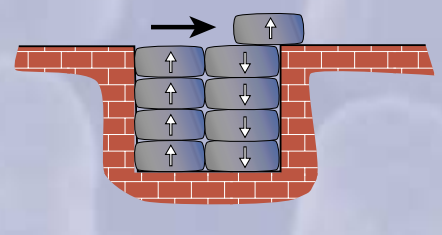




Elektronen vullen als rotsblokken de kwantumdot. Per niveau passen er twee: eentje met spin-up en eentje met spin-down.



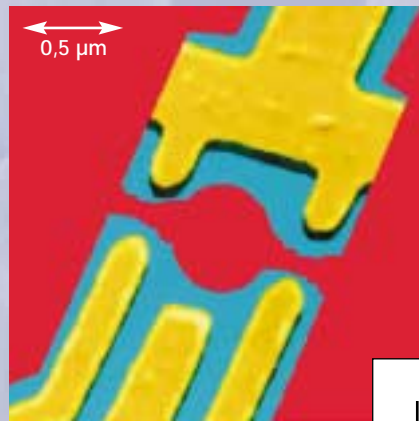
Als de diepte van de put niet precies bij de niveaus past, blokkeert de energie (hoogte) van de laatst toegevoegde elektronen de doorgang.



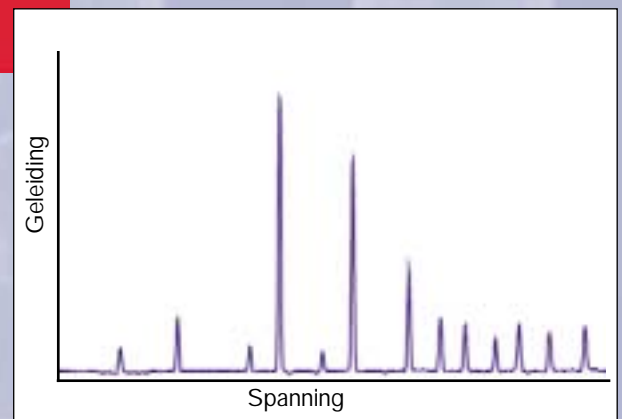
Pas als de diepte van de kuil precies correspondeert met de hoogte van de blokken, kunnen de volgende elektronen een voor een 'door' de kwantumdot heen-springen.

### Coulomb-oscillaties

Een kwantumdot kun je bijvoorbeeld maken door elektronen op te sluiten in een halfgeleiderlaag (rood). Elektroden (geel) met een negatieve spanning stoten de elektronen in de laag af. Effectief is daardoor het rode 'bolletje' tussen de elektroden een kwantumdot. Via de nauwe rode 'draadjes' links en rechts springen ze de dot op en af. Door de spanning op de middelste van de drie elektroden beneden te variëren, wijzig je de energie van de elektronen die in de dot zitten ...



... en daarmee hun aantal. In de analogie van de kuil hierboven: liggen de rotsblokken dieper (lagere energie), dan komen er nieuwe bij. Als de rotsblokken precies tot aan de rand staan, kunnen andere blokken over de kuil heenschuiven. De elektronen springen dan één voor één door de dot heen. De geleiding vertoont dan een piek, zoals hiernaast. Deze zogenaamde **Coulomb-oscillaties** (de piekjes) tellen individuele elektronen op de kwantumdot.



sterker nog, we moeten heel erg ons best doen om het te kunnen waarnemen.

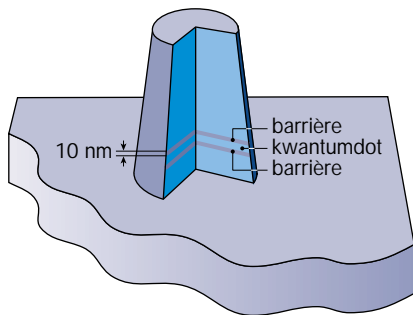
De dots moeten extreem koud zijn, wil het werken. De karakteristieke Kondo-temperatuur ligt bij kwantumdots namelijk nog een stuk lager dan bij metalen, namelijk zo rond de 1 kelvin of lager, in plaats van de 10 kelvin bij metalen.

Een andere cruciale factor is de grootte van de zogenaamde *tunnelbarrière*. De tunnelbarrière is de 'hobbel' die een vrij elektron moet nemen om in of uit de kwantumdot te springen – of te *tunnelen*,

zoals dat heet (in het voorbeeld met de rotsblokken en de kuil hebben we die hobbel weggelaten). Het proces is enigszins te vergelijken met een biljartbal die tegen een heuveltje oprolt. Als de biljartbal voldoende snelheid (energie) heeft, rolt hij eroverheen. Zoniet, dan komt hij terug. Onze elektronen gedragen zich echter anders, namelijk kwantummechanisch. Hier houdt dat in dat zelfs als ze niet voldoende energie hebben om óver de heuvel heen te rollen, er een kans bestaat dat ze er als het ware dóórheen gaan. Dat enigszins mysterieuze proces, dat volgens de klassieke natuur-

kunde onmogelijk is, heet *tunnelen*.

De kans dat een elektron door zo'n barrière heen tunnelt, neemt af naarmate de barrière hoger of dikker is. Beide contacten van de kwantumdot vormen zo'n tunnelbarrière. De tunnelbarrière moet enerzijds zo laag mogelijk zijn zodat de vrije elektronen makkelijk door de dot heen kunnen tunnelen, maar anderzijds niet zo laag dat de elektronen die in de dot zijn opgesloten, vrijkomen. Dat is een moeilijk en subtiel spel van afregelen voor de experimentalist, maar biedt wel de gelegenheid het Kondo-effect te manipuleren.



### Kwantumtoren

Een verticale kwantumdot wordt gemaakt uit halfgeleidermaterialen waaruit bijvoorbeeld ook computerchips bestaan. De laag waarop de toren staat, is een geleider, evenals de bovenkant. Een klein tussenstuk van de toren wordt geflankeerd door twee barrières van 10 nm dik. De barrières isoleren weliswaar, maar vanwege hun kleine dikte kunnen elektronen er toch doorheen springen. De ruimte tussen de barrières is de eigenlijke kwantumdot.

Om een magnetische onzuiverheid (zoals die voorkomt in het magnetisch verontreinigde metaal) na te doen met een kwantumdot, is het zaak dat de netto spinwaarde van alle elektronen op de dot samen niet nul is. Aangezien twee elektronen met tegengestelde spin elkaars spin opheffen en dus netto geen spin hebben, kan de netto spinwaarde van de elektronenvijver alleen ongelijk nul zijn als het aantal elektronen oneven is (wel, uitzonderingen daargelaten, maar daar gaan we nu niet op in). Door in de elektronenvijver van de kwantumdot steeds een elektron bij te stoppen of weg te pikken, schakelt het aantal steeds van even naar oneven en schakelen we de kwantumdot steeds om van een Kondo- naar een non-Kondosysteem.

Het mooie van zo'n kwantumdot is dan ook dat we als experimentatoren de parameters van het systeem in handen hebben: we kunnen het Kondo-effect van een enkele magnetische onzuiverheid manipuleren door bijvoorbeeld het aantal elektronen te veranderen of de grootte van de tunnelbarrière aan te passen. In het geval van de verontreinigde metalen kan dat niet – er is dan sprake

van een groot aantal verontreinigingen, zonder dat we de individuele eigenschappen daarvan in de hand hebben.

### Gedooogbeleid

Hoe steekt het mechanisme van het Kondo-effect nu eigenlijk in elkaar? Laten we nog eens kijken naar de Coulomb-oscillaties. We zagen al dat als de aanstormende elektronen geen bereikbaar energieniveau op de kwantumdot tot hun beschikking hebben, ze niet kunnen tunnelen en dus niet door de dot heen kunnen. Dat was de zogenaamde *Coulomb-blokkade*.

Welnu, in de praktijk blijkt de geleiding van de kwantumdot in zo'n geval niet helemaal nul te zijn: er komen nog steeds elektronen door de dot heen, zij het maar enkele. Dat dat gebeurt, ligt aan het optreden van zogeheten *co-tunnelprocessen*. Bij co-tunnelen bewegen twee (of meer) elektronen vlak na elkaar door de kwantumdot heen: er tunnelt er eerst eentje de dot af, en direct daarna tunnelt er een de dot op. Nadat de eerste er vanaf is getunneld, bevindt de kwantumdot zich in een *virtuele toestand*. Dat is een toestand die eigenlijk niet kan bestaan, bijvoorbeeld omdat de wet van behoud van energie is geschonden. De kwantummechanica is echter wat soepeler dan de klassieke natuurkunde, en laat het bestaan van zo'n toestand wél toe – zij het maar heel even. Als direct daarna het tweede elektron de dot optunnelt en de energiebalans weer in evenwicht brengt, staan de wetten van de kwantummechanica het toegelukkig toe. Het is een soort van gedooogbeleid op microscopisch niveau.

Aangezien bij co-tunneling twee (of meer) elektronen vrijwel tegelijkertijd

## Co-tunneling

tunnelen, is de kans hierop een stuk kleiner dan de kans op gewone tunneling. Vooral als we de tunnelbarrières groot maken, wordt de kans op co-tunneling verwaarloosbaar en is de Coulomb-blokkade nagenoeg compleet. We zullen nu zien dat we het Kondo-effect in kwantumdots kunnen waarnemen als we de tunnelbarrières juist zo laag mogelijk maken.

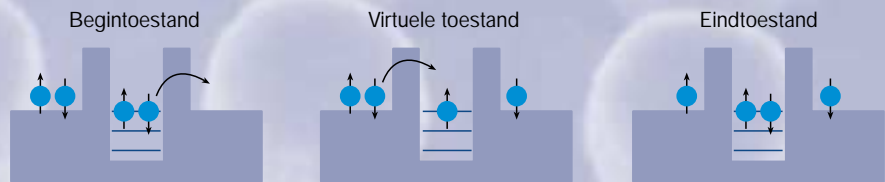
Laten we de energieniveaus in de kwantumdot eens bekijken. We kunnen die min of meer vergelijken met de treden van een trap. De kwantummechanica schrijft aan elektronen voor dat er nooit twee in exact dezelfde toestand mogen zitten. Dat heet het *Pauli-uitsluitingsbeginsel*, vernoemd naar de ontdekker van het beginsel, de natuurkundige Wolfgang Pauli. In ons geval betekent dat dat er op elke trede van de trap (op elk energieniveau) slechts twee elektronen mogen zitten: eentje met spin-up en eentje met spin-down. Toevoegen van een derde elektron zou het Pauli-principe immers schenden.

Voor het gemak kijken we nu alleen even naar de hoogste trede in de kwantumdot waarop nog elektronen zitten. De rest laten we even buiten beschouwing. Dit is niet zo'n gekke benadering, omdat de onderliggende energieniveaus allemaal gevuld zijn met twee elektronen met tegengestelde spin, die dus netto niet aan de spin van de dot bijdragen.

Beschouw nu dat bovenste energieniveau en neem eens aan dat de kwantumdot in Coulomb-blokkade is. Er kan geen normaal tunneltransport plaatsvinden, maar co-tunneling is nog steeds mogelijk, zeker als we de barrières niet te groot maken. Als we een even aantal

### Even aantal elektronen

Bij co-tunneling springt een elektron uit de dot, direct gevolgd door een ander elektron dat de dot in springt. De tussentoestand schendt eigenlijk de wet van behoud van energie en kan daardoor slechts heel kort bestaan. Het netto-resultaat is dat een elektron, hier met spin-down, door de dot is heengesprongen. De spinrichting blijft daarbij ongewijzigd.



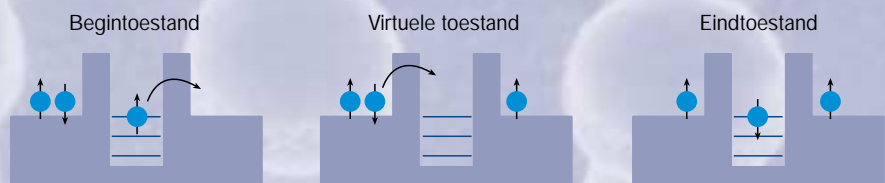
Bij een even aantal elektronen op de dot is het hoogste gevulde energieniveau bezet met twee elektronen: eentje met spin-up en eentje met spin-down. Een elektron kan uit de dot springen, hoewel het daarvoor eigenlijk te weinig energie heeft.

Daardoor kan de tussentoestand (een **virtuele** toestand) maar heel kort bestaan. De energiebalans moet direct weer worden hersteld door een elektron dat de dot in springt.

Het nieuwe elektron moet dezelfde spinrichting hebben als het weggesprongen elektron. In de eindsituatie moet het niveau weer bezet zijn met elektronen met tegengestelde spin.

### Oneven aantal elektronen

Bij een oneven aantal elektronen kan dit tweestapsproces wél leiden tot om draaien van de spin. Effectief is een elektron met spin-down door de dot heengesprongen, waarbij de spin is omgedraaid. Dit resulteert uiteindelijk in het Kondo-effect.



elektronen op de dot hebben, is het niveau gevuld met twee elektronen, eentje met spin-up en de ander met spin-down. De nettospin van de kwantumdot is nul en het optreden van co-tunneling kan hier niets aan veranderen. Een elektron dat uit de dot co-tunnelt moet snel worden gevolgd door een plaatsvervanger die de dot in co-tunnelt en die dezelfde spin heeft. Bij een even aantal elektronen in de dot kan de totale spinwaarde van de elektronen in de dot dus niet veranderen.

Bij een oneven aantal elektronen kan dit echter wel. Het hoogstliggende energieniveau bevat nu maar één elektron dat via co-tunneling stuivertje kan wisselen met een elektron met tegengestelde spin. Een opeenvolging van vele co-tunnelprocessen leidt ertoe dat zich een Kondowolk rond de dot vormt die de spin op de dot afschermt. De Coulomb-blokkade wordt zo onderdrukt en kan zelfs geheel overwonnen worden.

Als de Coulomb-blokkade geheel is overwonnen, stromen elektronen vrijelijk, dus zonder barrière, door de dot heen. Dit heet de *unitaire limiet*, en houdt in dat de waarschijnlijkheid dat een elektron door de dot heentunnelt gelijk is aan honderd procent. Dit is een verbazingwekkend verschijnsel. De kwantumdot heeft immers twee tunnelbarrières (eentje om erop te tunnelen en eentje om er weer af te tunnelen), die ieder een transmissie hebben die veel kleiner is dan honderd procent.

Het aantonen van deze unitaire limiet bij kwantumdots is één van de laatste mijlpalen in het Delfts-Japanse onderzoek aan het Kondo-effect en leverde een publicatie op in het Amerikaanse wetenschappelijke tijdschrift *Science*.

Het onderzoek aan kwantumdots en het Kondo-effect heeft de magische wereld van de kwantummechanica een stukje dichterbij gebracht. Dat nano-

technologie en daarmee kwantummechanica een steeds belangrijkere rol zullen gaan spelen, is zeker. Dat we er over een jaar allemaal een Kondo-kwantumdot thuis in onze koelkast op nahouden, ligt niet voor de hand, maar de fundamentele kennis van vandaag zal zeker zijn weg vinden in de toepassing van morgen.

#### Informatie

##### Internet

De kwantumdot-thuispagina is te vinden op [vortex.tn.tudelft.nl/grkouwen/qdotsite.html](http://vortex.tn.tudelft.nl/grkouwen/qdotsite.html).

##### Literatuur

L.P. Kouwenhoven en C.M. Marcus. *Quantum Dots*. Physics World vol. 11 nr. 6, pag. 35 (1998). (Download als pdf op [vortex.tn.tudelft.nl/~leok/pdf-publications/no71.pdf](http://vortex.tn.tudelft.nl/~leok/pdf-publications/no71.pdf).)

L.P. Kouwenhoven en L.I. Glazman. *Revival of the Kondo effect*. Physics World vol. 14 nr. 1, pag. 33 (2001).