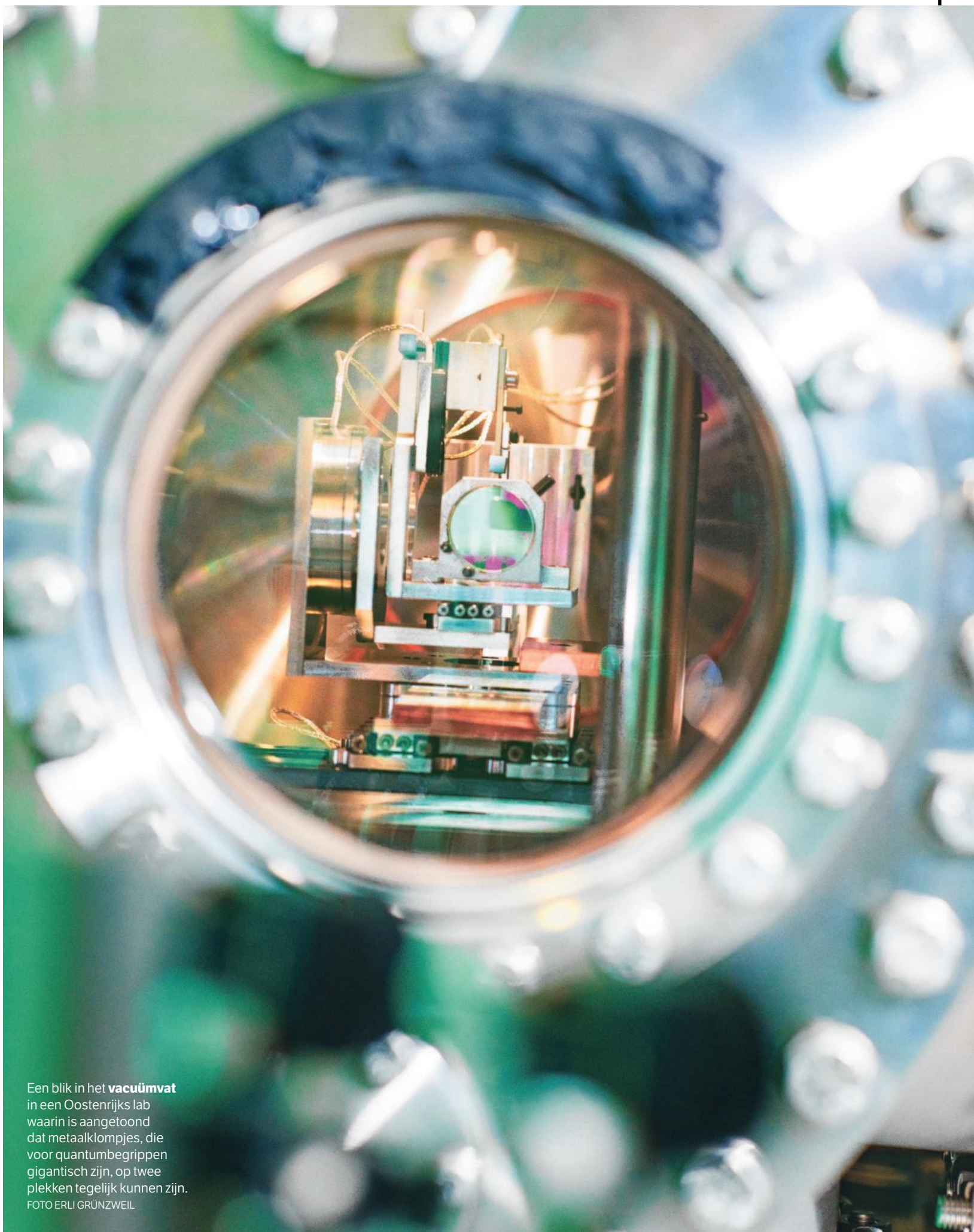


| WETENSCHAP

Quantummechanica

Een piepklein klompje
metaal kan op twee
plekken tegelijkertijd zijn

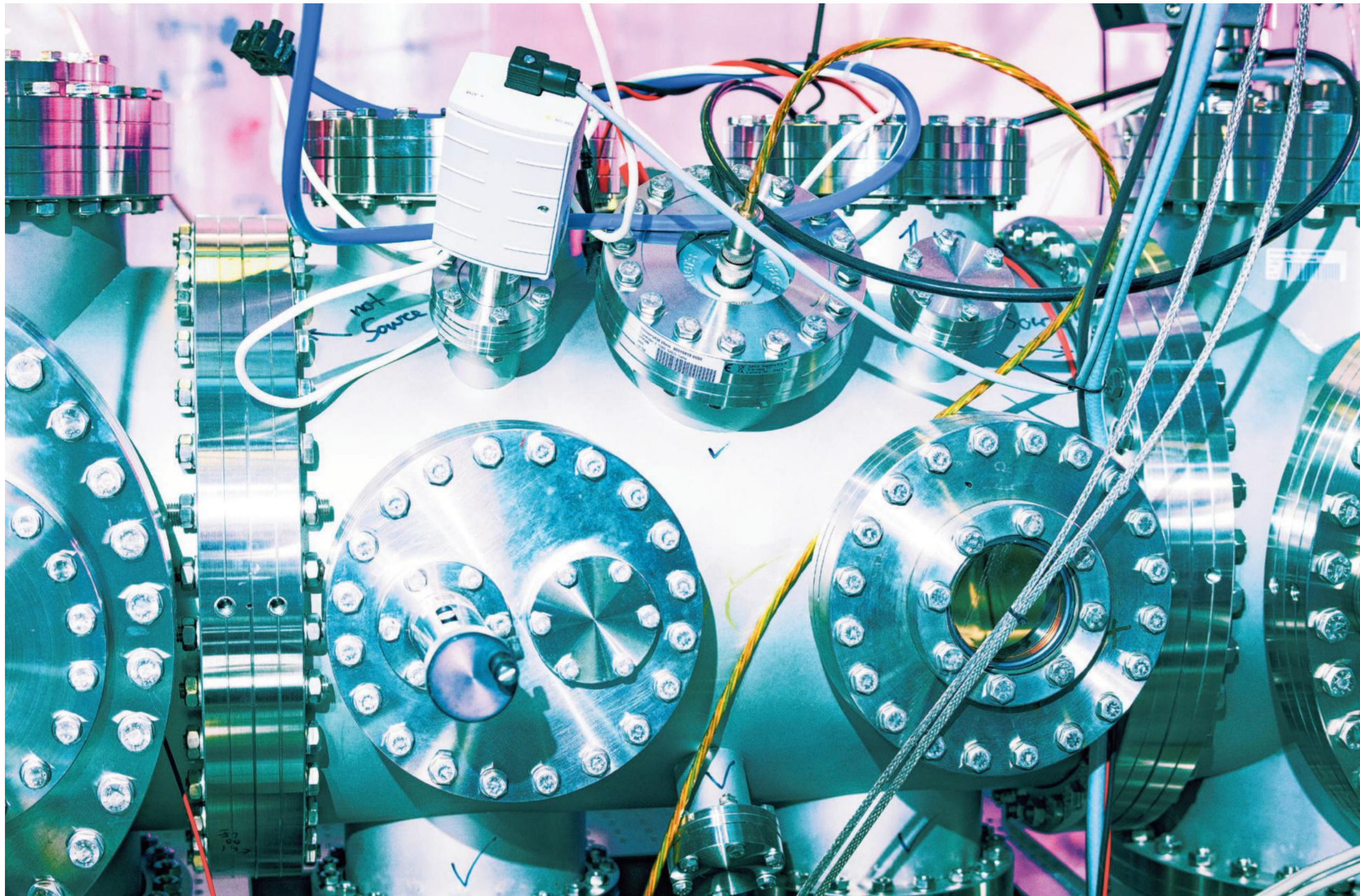
PAGINA 4-5



Een blik in het **vacuümvat** in een Oostenrijks lab waarin is aangetoond dat metaalklompjes, die voor quantumbegrippen gigantisch zijn, op twee plekken tegelijk kunnen zijn.
FOTO ERLI GRÜNZWEIL

De quantumwereld nadert

Op welk punt houden de wetten van de quantummechanica op te bestaan en begint onze „gewone” klassieke werkelijkheid?



In deze **vacuümbuis** van ongeveer twee meter lang – vol meetapparatuur en elektronica – worden metaalklompjes van enkele miljoenste van een millimeters groot aangezet tot quantumgedrag waarbij ze op meerdere plekken tegelijk zijn.

NATUURKUNDE

Fysici proberen Schrödingers kat steeds groter te maken

Elektronen en lichtdeeltjes gedragen zich volgens de wetten van de quantummechanica. Ze kunnen bijvoorbeeld op meerdere plekken tegelijk zijn. Maar kan die vreemde quantumwereld ook doordringen tot de 'normale' werkelijkheid?

Door **Dorine Schenk** Fotografie **Erlri Grünzweil**

Kan een piepklein klompje metaal op twee plekken tegelijkertijd zijn? Het verrassende antwoord is 'ja'. Begin dit jaar liet een groep natuurkundigen in Oostenrijk zien dat minuscule metalen bolletjes zich gedragen volgens de tegenintuïtieve wetten van de quantummechanica. Met hun doorsnee van 0,000008 millimeter zijn deze klompjes voor quantumbegrippen gigantisch. Zo brengt dit experiment de quantumwereld een stapje dicht bij onze macroscopische werkelijkheid.

Met dit onderzoek proberen natuurkundigen een vraag te beantwoorden die al in de lucht hangt sinds de ontwikkeling van de quantummechanica, een eeuw geleden: waarom lijken in de wereld van het allerkleinste andere regels te gelden dan in onze grote alledaagse wereld?

Elektronen, atomen, lichtdeeltjes en andere kleine verschijnselen gedragen zich volgens de wetten van de quantummechanica, wat betekent dat ze bijvoorbeeld op meerdere plekken tegelijk kunnen zijn. Maar waarom kunnen tafels, katten of mensen dat niet? Waarom schikken die zich naar de klassieke mechanica? En waar ligt dan de grens? Wanneer gaat die vreemde quantumwereld over in onze „gewone” klassieke werkelijkheid? Oftewel: zit er een

grens aan hoe groot of zwaar een quantumobject maximaal kan zijn? Kan de kat uit het beroemde gedachte-experiment van de Oostenrijkse Erwin Schrödinger inderdaad levend en dood tegelijk zijn?

Kansen en golven

Volgens de quantummechanica, die vorig jaar haar honderdste verjaardag vierde, hebben quantumobjecten, zoals elektronen, lichtdeeltjes en atomen, geen duidelijk gedefinieerde fysische eigenschappen. Je kunt bijvoorbeeld de locatie van een elektron niet precies berekenen. Het enige wat je kunt achterhalen is *de kans* dat je dit deeltje op een bepaalde plek zult aantreffen bij een meting. Daarnaast is er ook een kans dat je het elektron links, rechts, boven of onder die plek vindt. De verdeling van de kansen om het deeltje op bepaalde plekken aan te treffen, heet de golf functie. Als vereenvoudigd voorbeeld kun je je dit voorstellen als een simpele golfvorm in de ruimte met een top en aan weerszijden een aflopende helling. Bij de top - waar de golf functie het hoogst is - is de kans om het elektron aan te treffen het grootst en verder daar vandaan wordt de kans steeds kleiner.

Hoewel je heel nauwkeurig de vindkansen kunt bepalen met deze golf functie, is er voordat je gaat meten geen enkele manier om zeker te weten waar je het deeltje zult

aantreffen. Dat verschilt van een klassiek deeltje, zoals een knikker, waarbij je wel precies kunt berekenen waar je hem zult aantreffen als je alle details weet, zoals hoe snel hij rolt en over wat voor ondergrond. Een klassiek deeltje bestaat altijd op een duidelijke plek.

Die duidelijkheid geldt volgens de quantummechanica niet voor een quantumdeeltje. Dat is echt op meerdere plekken tegelijkertijd - als een golf die zich uitstrekt in de ruimte. Quantumfysici zeggen dan dat het elektron in een zogeheten *superpositie* van verschillende locaties is.

Hoewel dit tegen onze klassieke intuïtie ingaat, hebben natuurkundigen de quantummechanica omaarmd. De theorie is namelijk ontzettend succesvol en veelvuldig bewezen met zeer nauwkeurige experimenten. „De quantumwereld begrijpen we fantastisch”, zegt experimenteel quantumfysicus Dirk Bouwmeester, van de Universiteit Leiden en de Universiteit van Californië in Santa Barbara. „We kunnen er perfect mee rekenen en eenvoudig het gedrag van atomen beschrijven. De echte vraag is dus hoe de klassieke realiteit die wij ervaren ontstaat.”

Dode en levende katten

In de quantumwereld zijn quantumeigenschappen, zoals locatie, snelheid (of impuls)

en een soort magnetisch moment, niet duidelijk gedefinieerd, maar verkeren ze in een wolk van verschillende waarden tegelijk, met verschillende kansen.

De quantummechanica beschrijft dit uitstekend. Waar ons begrip nog tekortschiet is het moment waarop die kansenwereld overgaat in de fysieke werkelijkheid. Dit gebeurt zodra je een meting of observatie doet. Meetinstrumenten geven altijd een eenduidige waarde aan voor bijvoorbeeld de locatie van een deeltje. Fysici zeggen dat de golf functie dan 'ineenstort' waardoor er nog maar één gedefinieerde waarde overblijft. De vraag is dan wat een meting precies is. Heb je daarvoor een meetinstrument nodig? Of bewustzijn? Of kan bijvoorbeeld een steen ook iets 'meten'? Dit zogeheten meetprobleem - waar nog geen duidelijke oplossing voor is - houdt verband met de vraag waarom we in ons dagelijks leven geen quantumwazigheid zien.

Schrödinger illustreerde dit vraagstuk in 1935 met het wrede gedachte-experiment van een kat in een afgesloten doos. In de doos zat ook een dodelijk gif waarvan het vrijkomen gekoppeld was aan bijvoorbeeld de locatie van een quantumdeeltje. Omdat het deeltje tegelijk op meerdere plekken is, kun je zeggen dat het gif zowel niet als wel vrijgekomen. Dat zou betekenen dat de kat tegelijk dood en levend is, totdat je de doos opendoet en kijkt, of meet, hoe het met het dier gaat.

Hiermee riep Schrödinger de vraag op of de kat in dit gedachte-experiment inderdaad een onzeker quantumobject is of dat iets ervoor zorgt dat de golf functie van een dusdanig groot object instort waarmee het lot van de kat bepaald wordt.

De quantummechanica lijkt hier zelf niets over los te laten, vertelt theoretisch fysicus Angelo Bassi, van de Universiteit van Triëst in Italië. „Cellen, muizen, mensen en katten kunnen volgens deze theorie allemaal quantumgedrag vertonen. Maar dat zien we niet. We ervaren een klassieke wereld. Op de vraag waarom dat zo is, hebben we nog geen duidelijk antwoord.”

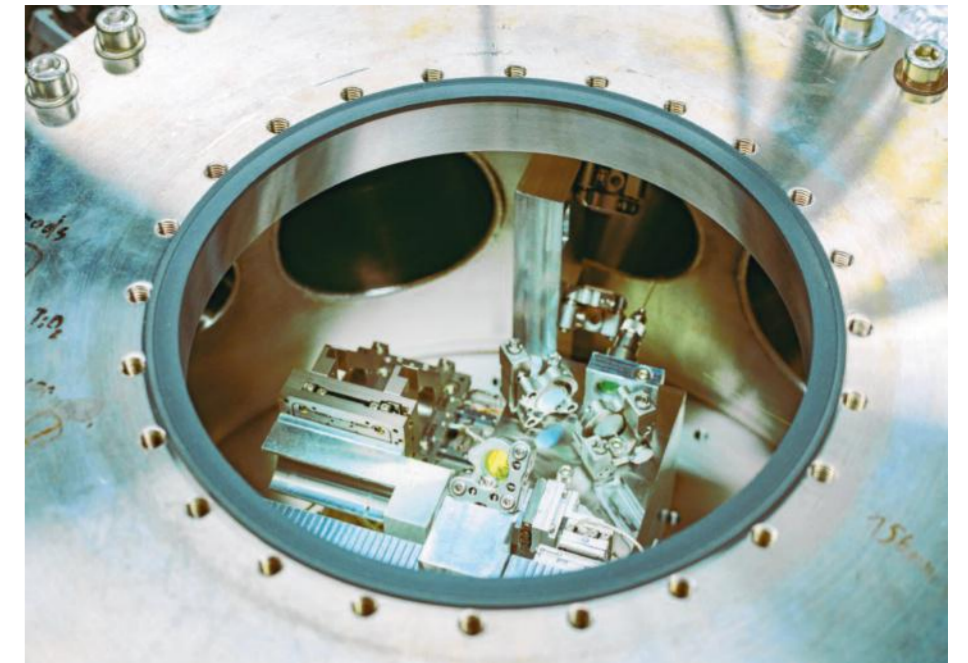
Darwin of zwaartekracht

Wel is er een scala aan complexe theoretische ideeën die dit proberen te verklaren. Iemand die daarbij dicht bij de quantummechanica probeerde te blijven was de Amerikaan Hugh Everett. Die stelde in 1957 in zijn proefschrift een veel-werelden-model voor waarbij de golf functie nooit instort. In plaats daarvan vertakt de wereld in alle mogelijke scenario's van de golf functie. Er is dus een wereld waarin je het elektron op de ene plek meet en een waarin je het op een andere plek meet.

De Poolse Wojciech Zurek beschrijft in zijn vorig jaar verschenen boek *Decoherence and Quantum Darwinism* een ander model, waarbij de klassieke wereld voortkomt uit de quantummechanica, genaamd quantumdarwinisme. Hierbij zou de interactie van de omgeving met een quantumstelsel er - op

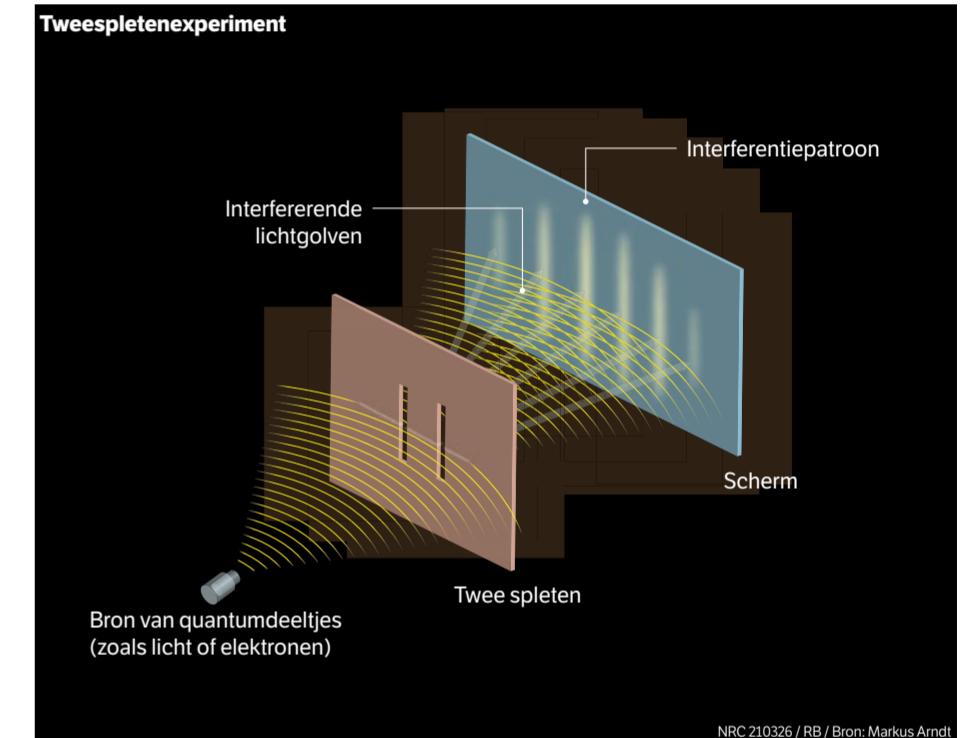
” Quantum begrijpen we fantastisch, de echte vraag is hoe de klassieke realiteit die wij ervaren ontstaat

Dirk Bouwmeester quantumfysicus



Een **opstelling van lenzen en spiegels** in het vacuüm stuurt lasers aan die metaaldeeltjes in een quantumtoestand brengen. Ook wordt er (tussen de paarsroze lens en een spiegel) een staande laserlichtgolf gecreëerd om een variant van het tweespletenexperiment mee uit te voeren om te toetsen of de deeltjes quantumgedrag vertonen.

Een simpel experiment om quantumgedrag aan te tonen



NRC210326 / RB / Bron: Markus Arndt

een complexe manier - voor zorgen dat er uiteindelijk bepaalde eigenschappen „uitselecteren”, analoog aan Darwins evolutietheorie voor levende wezens. Die overgebleven eigenschappen vormen onze klassieke ervaring.

Daarnaast zijn er ook ideeën die ervan uitgaan dat het onvermijdelijk is dat golf functies op een bepaald moment ineenstorten, zodat er een eenduidige, klassieke eigenschap overblijft. „Hoe groter het quantumobject, hoe sneller dit zou gebeuren”, zegt Angelo Bassi, die hieraan werkt. „Er zijn grofweg twee ideeën over waarom dit gebeurt. De ene stelt dat dat nu eenmaal is hoe de natuur werkt: het universum is willekeurig. De andere tak zoekt een onderliggende reden.”

Daar zijn verschillende voorstellen voor. De Britse Nobelprijswinnaar Roger Penrose voorspelt bijvoorbeeld dat de zwaartekracht die ineenstorting kan veroorzaken. Hij maakt hierbij de koppeling met Einsteins relativiteitstheorie die zwaartekracht beschrijft als het krommen van de ruimtetijd door massa's. Hoe groter de massa van een deeltje, hoe meer het de ruimtetijd eromheen beïnvloedt, legt Bouwmeester uit. Als je een deeltje met een flinke massa in een superpositie van twee plekken brengt, dan moet de ruimtetijd daar dus iets mee.

„Penrose voorspelt - het is een voorspelling, nog geen uitgewerkte theorie - dat dit

extra energie kost”, zegt Bouwmeester. Volgens de quantummechanica mag je een beetje energie 'lenen van het heelal', maar alleen voor heel korte tijd. De tijd dat deeltjes in een superpositie kunnen verkeren, is dus kort. Grotere massa's en grotere afstanden tussen de twee superpositieplekken, vergen meer energie en kunnen daarom, volgens Penroses voorspelling korter bestaan.

Bouwmeester en Bassi hebben geen voorkeur voor een van de verklaringen. „De meeste zijn ongelooflijk, maar de werkelijkheid is ongelooflijk, dus alles is mogelijk”, zegt Bouwmeester.

„Om verder te komen zijn experimenten nodig die naar quantumgedrag kijken bij steeds grotere en zwaardere objecten”, zegt Bassi. Verschillende theoretische ideeën voorspellen namelijk verschillende momenten waarop de grens tussen de quantumwereld en onze klassieke werkelijkheid bereikt wordt. „Het zou mooi zijn als experimenten geen superposities meer zien”, vervolgt Bassi. „Dat zou betekenen dat de quantummechanica niet klopt en dat we de natuurkunde helemaal opnieuw moeten gaan uitvinden. Dat zou een fantastisch nieuw avontuur zijn.”

LEES VERDER OP PAGINA 77

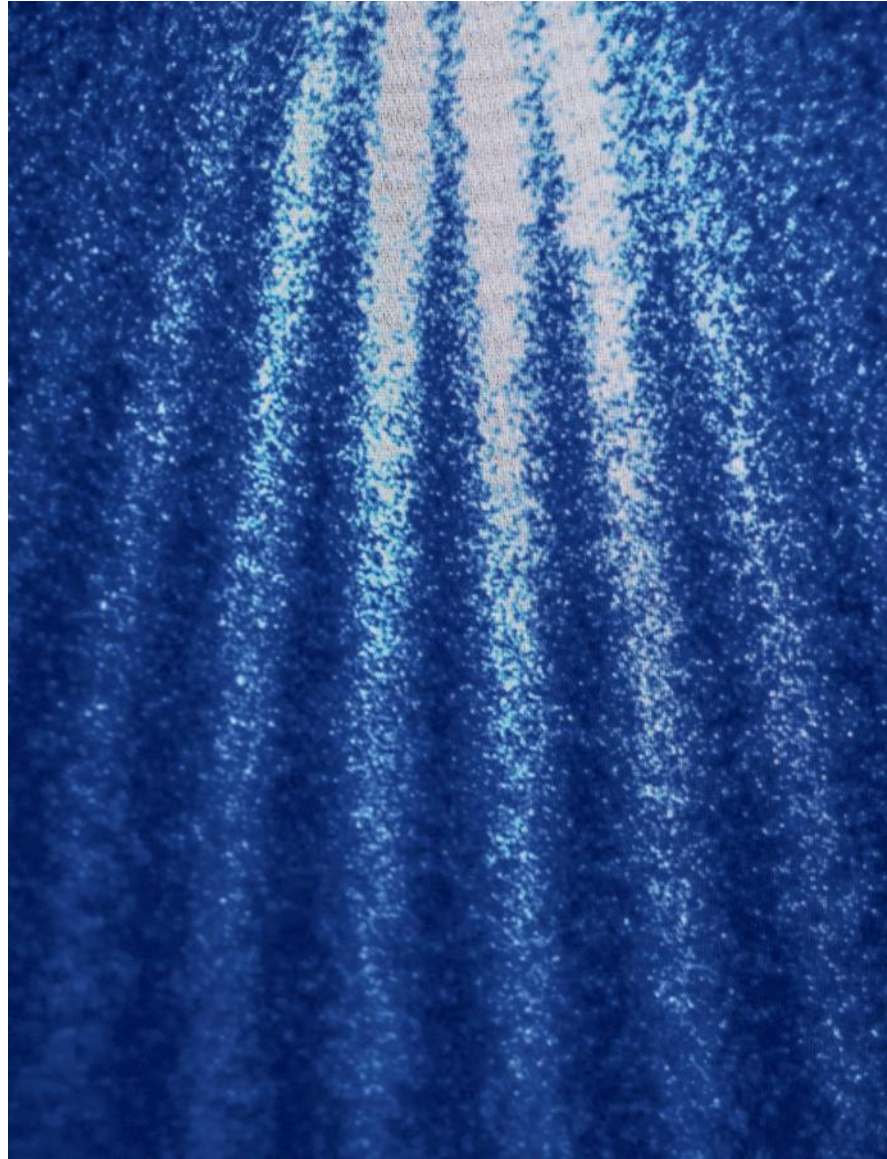
Twee spleten

„Wereldwijd lopen verschillende, extreem nauwkeurige quantummetingen, maar die zijn nu nog niet macroscopisch genoeg om deze ideeën te testen”, zegt Markus Arndt, van de Universiteit van Wenen, die met Stefan Gerlich het Oostenrijkse onderzoek met metaalklompjes leidt. Dit zijn complexe experimenten omdat de kleinste trillingen of magneetvelden quantumobjecten kunnen verstoren.

Arndt werkt al ongeveer dertig jaar aan opstellingen met steeds grotere en zwaardere deeltjes, om te kijken hoe ver ze de quantumwereld kunnen oprekken. Hun meest recente resultaten verschenen eind januari in *Nature*. De metaalklompjes die ze in de *Nature*-publicatie beschrijven zijn voor quantumbegrippen gigantisch. Ze bestaan uit enkele duizenden natriumatomen en zijn daardoor zwaarder dan de meeste eiwitten. Met hun doorsnee van 0,000008 millimeter zijn ze ongeveer even groot als de transistors, de bouwstenen van moderne computerchips.

„We maken een bundel van metaaldeeltjes”, vertelt Arndt. Die brengen de onderzoekers vervolgens met lasers via een complex proces in een superpositie van verschillende locaties. „Om te testen of dit gelukt is, voeren we een soort tweespletenexperiment uit.” Bij dit experiment schijn je een bundel licht of andere deeltjes op een plaat met twee smalle spleten. Gewone, klassieke deeltjes schieten door een van de twee spleten, waardoor er twee strepen van deeltjes vormen op een scherm achter de plaat. Quantumdeeltjes leveren een ander patroon omdat ze zich gedragen als golven die tegelijk door beide spleten gaan als ze tegen de plaat ‘klotzen’. Die golven interfereren achter de plaat, waarbij hun pieken en dalen elkaar versterken of uitdoven.

Dit resulteert in een zogenoemd interfe-



Bij het **tweespletenexperiment** tonen metaalbolletjes hun quantumgedrag. Als je een bundel van deze deeltjes door spleten schijnt, gedragen ze zich als golven die er doorheen klotzen. Omdat de pieken en dalen daarvan elkaar soms versterken en soms uitdoven, ontstaat dit zogeheten interferentiepatroon. Op de lichtere plekken zijn veel metaalbolletjes terecht gekomen, op de donkere plekken niet.

rentiepatroon van lichte en donkere strepen op het scherm. Arndt en zijn collega's gebruikten geen fysieke plaat met spleten, maar een zogeheten staande laserlichtgolf, waarbij de knooppunten van de golf (waar de intensiteit het laagst is) fungeren als spleet en de antiknooppunten (met hoge intensiteit) de deeltjes verwijderen en dus dienst doen als plaat. Dit resulteerde in een interferentiepatroon zoals je verwacht van quantumdeeltjes. Zo konden ze aantonen dat de metaalklompjes quantumgolfgedrag vertonen.

Grotere massa's, grotere superposities

De metaaldeeltjes waren niet de zwaarste 'Schrödingers katten' die ooit gemaakt zijn. Zo toonde Yiwen Chu, van de Zwitserse universiteit ETH Zürich, in 2023 met collega's aan dat een mechanisch trillend keramisch materiaal van 16 microgram in quantumsuperpositie kon worden gebracht. „Wat het grootste quantumobject is, hangt ervan af wat je bedoelt”, zegt Chu. „Je kunt kijken naar de massa, het aantal atomen of bijvoorbeeld hoe groot de superpositie is, en dus hoe ver de twee posities waar een quantumdeeltje tegelijk is bij elkaar vandaan zijn.”

Hoewel Chu's object veel zwaarder was dan dat van Arndt, was de superpositie die ze creëerde kleiner. „Kleinere, lichtere objecten zijn gemakkelijker in een grote superpositie te brengen dan grote zware objecten”, vertelt ze. „Maar de experimenten vullen elkaar aan. Markus [Arndt] werkt aan steeds grotere massa's en wij proberen de superposities steeds groter te maken. Hopelijk komen onze experimenten op een dag bij elkaar.”

„Tot nu toe bevestigen alle experimenten de quantummechanica en is de grens naar de klassieke wereld nog niet in zicht”, zegt Arndt. Maar zijn team geeft niet op. Een quantumkat is misschien wat veel gevraagd, maar is een Schrödingers bacterie haalbaar? Arndt: „Dat is nog heel ver weg, maar het lijkt me niet onmogelijk.”