

Welkom, dames en heren, dankuwel voor uw komst. Het komende uur zal ik mijn proefschrift verdedigen. □ Zo'n officiële verdediging is natuurlijk niet echt de plaats voor experimentele presentaties, maar toch ga ik iets ongebruikelijks proberen. □ In de volgende tien minuten ga ik uitleggen waar mijn proefschrift over gaat, en omdat ik graag wil dat niet-Nederlands sprekenden er ook iets van meekrijgen, heb ik mezelf ondertiteld. Let er maar niet op. □ Laten we beginnen met het woord quantum, dat wellicht het meest intimiderende woord in de titel van het proefschrift is. □ Kwantummechanica is de beste beschrijving van de natuur op kleine schaal die we hebben. □ Het is wel een hele vreemde beschrijving, want als je heel ver inzoomt, gedraagt de natuur zich zo gek, dat je je dat eigenlijk niet voor kunt stellen. □ Dat komt natuurlijk omdat wij onze intuïtie voor wat we gek vinden, en wat niet, opgedaan hebben op de schaal van het alledaagse leven van ons "grote" mensen. □ Wij vinden het bijvoorbeeld normaal dat je niet over water kunt lopen, en dat je water niet zomaar in je handen kunt dragen. □ Maar als je klein genoeg bent, zoals deze vrolijke vliegen hier, is dat ineens helemaal niet meer zo gek. □ Op de nog kleinere schalen waarop kwantummechanica een rol speelt, zijn er nog fundamenteelere gekkigheden, □ maar aan dit voorbeeld kun je wel al zien dat er gekke dingen kunnen gebeuren naarmate je kleiner bent. □ Die fundamentele vreemdheid van hele kleine schalen heeft voordelen. Door ze te gebruiken kunnen we bijvoorbeeld een soort telefoonlijn maken, waarbij je kunt zien of iemand je zit af te luisteren. □ En zo kunnen we ook computers maken die sommige problemen essentieel sneller kunnen oplossen dan onze huidige computers. □ Die zogeheten kwantumcomputers gebruiken dan ook essentieel andere grondbeginselen dan onze huidige computers. □ Zo weten jullie bijvoorbeeld hopelijk allemaal dat een computergeheugen uit *bits* bestaat, eenheden die ofwel 0 ofwel 1 kunnen zijn. Vandaag de dag kost één zo'n bit ongeveer 30 nanometer ruimte. □ Die afmetingen zijn natuurlijk niet altijd zo geweest. Vroegere computerbits waren veel groter. Toekomstige computerbits zullen steeds kleiner kunnen worden. □ Zó klein zelfs dat de wetten van de kwantummechanica in het spel komen. □ Als je een bit klein genoeg maakt, wordt het een quantum bit, oftewel qubit. Als je vraagt naar zijn waarde, is die nog steeds altijd ofwel 0 ofwel 1. □ Maar als je hem niks vraagt, kan het iets heel anders zijn. In het algemeen is zijn toestandsruimte een boloppervlak geworden, en niet meer twee losse punten. □ Dat houdt in dat er gekke dingen kunnen gebeuren. □ Als het qubit bijvoorbeeld in deze toestand is, krijg je de helft van de keren een uitkomst 0, als je daarnaar vraagt, en de andere helft van de keren een uitkomst 1. □ In zekere zin is het qubit tegelijkertijd 0 en 1, hoewel die formulering erg misleidend is. □ Net zoiets geks gebeurt als je niet een maar twee qubits bekijkt. Die kunnen in zo'n toestand verstrengeld raken, □ dat als je de ene meet en die 0 blijkt te zijn, dat betekent dat de andere 1 moet zijn. Dat werkt instantaan zo, zelfs als ze kilometers van elkaar zijn. □ Het water in de twee uiteinden van een gebogen pijp heeft deze eigenschap ook, maar dat komt natuurlijk omdat ze communicerende vaten vormen. □ Het gekke bij verstrengelde qubits is dat dit gedrag optreedt zonder onderliggende oorzaak. □ De derde gekkigheid die ik aan wil stippen heet nietcommutataviteit, en houdt in dat het geen zin heeft sommige eigenschap-

pen van qubits tegelijkertijd te meten. □ Dat komt doordat de volgorde van de metingen er toe doet. Het effect is heel anders wanneer je eerst je kleren uittrekt en dan een douche neemt, □ dan andersom! Het moge duidelijk zijn dat de moraal van het verhaal is dat er ook nadelen zijn aan kwantummechanica: □ je moet het niet proberen te begrijpen, omdat je intuïtie je steeds de mist in zal sturen. Het is beter puur wiskundig te redeneren. □ Traditioneel gebeurt dit door een heleboel dingen aan te nemen over de verzameling toestanden van een quantum systeem. Voor de duidelijkheid: we hebben het nu dus over het geheel van alle mogelijke toestanden waarin een systeem zich kan bevinden. Voor een qubit is dit, zoals we gezien hebben, een boloppervlak. □ In de eerste helft van het proefschrift volg ik een andere aanpak, die nog een stapje verder gaat. Laten we even niet bescheiden zijn, en alle toestandsruimtes tegelijk bekijken, en alle mogelijke relaties ertussen. □ Dat heet een categorie, en zien jullie afgebeeld op de omslag van het proefschrift, en op vrijwel iedere bladzijde ervan: □ het gaat bij zulke diagrammen om de verbindingen tussen objecten, niet zozeer om de objecten zelf. □ Dus in plaats van een inwendige structuur van een kwantumsysteem aan te nemen, bekijken we alleen hoe het systeem zich verhoudt tot andere systemen. □ We weten nu immers juist niet wat de inwendige structuur van een quantum systeem is! Je zou kunnen zeggen dat we in plaats van een neurologische aanpak een sociologische aanpak verkiezen. □ In plaats van uit te proberen te vinden hoe de hersenen van één individu ineen steken, kijken we alleen hoe die persoon zich gedraagt in de maatschappij. □ Op deze manier kunnen we er kwalitatief achter komen welke eigenschappen quantumgedrag veroorzaken. □ Een belangrijke eigenschap is dat iedere relatie tussen twee quantum systemen omkeerbaar is: als systeem A op een of andere manier gerelateerd is aan systeem B , □ dan is B ook op een of andere manier aan A verbonden. Zo kun je een aanname over de categorie maken voor ieder gedrag dat je uit natuurkundige experimenten hebt verkregen uit een quantum systeem. □ In hoofdstuk 3 laat ik zien dat als je op die manier de drie gekkigheden aanneemt die we zojuist zagen, dat dan een categorie altijd in te bedden is in het traditionele natuurkundige model. □ In zekere zin is dit dus een rechtvaardiging voor de traditionele kwantummechanica. □ Zo blijkt bijvoorbeeld dat getallen inherent ingebouwd zitten in elk zo'n model voor kwantummechanica, ook al hebben we daar niks expliciet over aangenomen. □ De tweede helft van mijn proefschrift probeert dan toch nog kaas te maken van de onintuitieve gekkigheden. Met andere woorden: we proberen een logica op te zetten voor kwantummechanica. Laat me dat even uitleggen. □ De formele wiskunde, die we gebruiken ter vervanging van onze intuïtie, staat of valt met het begrip bewijs. □ Dat is een ander soort bewijs dan u misschien gewend bent uit bijvoorbeeld de rechtspraak. Ik bedoel bijvoorbeeld het bewijs van de bekende stelling van Pythagoras. □ Het is niet zo dat dat op honderd rechthoekige driehoeken getest is, en op de meeste daarvan wel klopte. □ Nee, door puur logische afleidingen te maken kun je zeker weten dat het voor iedere rechthoekige driehoek die je ooit tegen zult komen zal gelden. □ Hier is een heel simpel voorbeeld van zo'n bewijs. Het regent. Als het regent wordt je nat. Dus ik wordt nat. □ In symbolen: A en $A \Rightarrow B$, dus B . Merk op dat de logica zo eigenlijk de grammatica van een soort taal is.

□ Een ander zo'n grammaticaregeltje zou bijvoorbeeld kunnen zijn: $(A \text{ of } B)$ en $C = (A \text{ en } C) \text{ of } (B \text{ en } C)$. □ Om met hare koninklijke hoogheid prinses Maxima te spreken: stel dat je thee of koffie wordt aangeboden, met één koekje erbij. Dan verwacht je ofwel thee met een koekje, ofwel koffie met een koekje. □ Door alle gekkigheden met kwantummechanica hoeft dit echter niet meer te gelden! Er blijken eigenschappen van qubits te zijn waarvoor deze vergelijking niet meer opgaat ... □ Desondanks heet zo iets traditioneel "kwantumlogica". Hoofdstuk 4 laat zien dat deze zogenaamde "logica" onverminderd geldt in onze categorische modellen. □ Maar eigenlijk kun je zo iets monsterlijk onintuïtiefs natuurlijk geen logica noemen. Daarom probeer ik in hoofdstuk 5 iets anders. □ Eigenlijk halen we daar een technisch trucje uit: door de grammaticaregeltjes van je logica te veranderen, kun je net doen alsof een quantumstelsel wel intuïtief is. □ Stelt u zich eventjes voor dat onze wereld Smurvenland is, en u dus een Smurf bent. □ In die "echte wereld" zijn er dan quantumsystemen, die we niet echt kunnen begrijpen. In het stripverhaal is een quantumstelsel een pakje, dat er erg mysterieus uitziet. □ Maar als we het goede perspectief hadden gehad, wat het pakje heel normaal geweest. Als we bijvoorbeeld een Snorkel in plaats van een Smurf waren geweest, en dus onder water leefden, □ hadden we door de waterrimpels heen gekeken, en had het pakje er doodnormaal uitgezien. □ Nu zijn Smurven natuurlijk geen Snorkels, maar een smurf kan wel prima in Snorkelland leven. Hij hoeft alleen maar een zwembril en snorkel op te zetten, en te vergeten dat hij geen Snorkel is maar een Smurf. □ Zo kun je door "van wereld te veranderen" vreemde dingen normaal maken. Dat is grofweg de truc van hoofdstuk 5. □ Gegeven een enkel quantumstelsel, maken we een wereld waarin je prima kunt leven en waarin prima logische wetten gelden, en waarin het quantumstelsel er heel normaal uitziet. □ Als we de grammaticaregeltjes van onze logica aanpassen, kunnen we gekkigheid zo normaal maken. Met andere woorden: om kwantummechanica te kunnen "begrijpen", moeten we de goede taal spreken. U begrijpt dat dit een grove vereenvoudiging is, net als sommige eerdere analogieën. Op sommige punten is het zelfs niet helemaal correct wat ik gezegd heb, □ maar hopelijk is in ieder geval duidelijker geworden waar mijn proefschrift over gaat. In ieder geval kunnen jullie nu de woorden uit de titel plaatsen! □