

NWO-Huygenslezing

De Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) en NRC Handelsblad organiseren de NWO-Huygenslezing jaarlijks sinds 1992. Wetenschappers van wereldformaat spreken voor een breed publiek. De gemeente Den Haag treedt op als gastvrouw.

De sprekers van alle dertien edities van de NWO-Huygenslezing:

2005	Dirk Bouwmeester en Carlo Beenakker
2003	Tony Mikos en Christine Mummery
2002	Frans de Waal en Jan van Hoof
2001	Wilfred van Gunsteren en Jacob de Vlieg
2000	Carl Wieman (Nobelprijs 2001) en Jook Walraven
1999	Antonio Damasio en Fernando Lopes da Silva
1998	Tony Hoare en Jan Bergstra
1997	Paul Colinvaux en Henry Hooghiemstra
1996	Stanley Prusiner (Nobelprijs 1997) en Piet Borst
1995	Jonathan Spence en Erik Zürcher
1994	Pierre-Gilles de Gennes (Nobelprijs 1991) en Daan Frenkel
1993	Bert Bolin
1992	Nathan Glazer

Meer informatie over de Huygenslezingen staat op internet:
www.nwo.nl/huygens.

Van een aantal lezingen is via internet de bewerkte tekst te lezen of te bestellen.



Carlo Beenakker (1960) promoveerde in 1984 aan de Leidse Universiteit en was zes jaar in dienst van Philips' Natuurkundig Laboratorium in Eindhoven. Sinds 1991 is hij hoogleraar in Leiden. Beenakker werkt op het Instituut-Lorentz voor theoretische natuurkunde.

In 1993 kreeg Beenakker een Pionierssubsidie van NWO en in 1999 ontving hij de NWO-Spinozapremie voor zijn werk aan mesoscopische systemen. Overige onderscheidingen omvatten de C.J. Kokprijs (1985), de Koninklijke/Shell-prijs (1993) en de

Physicaprijs (2003). Beenakker is lid van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Voor meer informatie: www.beenakker.com.

Carlo Beenakker

De magie van quantumtechnologie

“Elke voldoende geavanceerde technologie is niet te onderscheiden van magie”

Arthur C. Clarke (fysicus en sciencefictionauteur), Profiles of the future, 1961

Deze tekst in essayvorm is geschreven door wetenschapsjournalist Bennie Mols, op basis van een interview met Carlo Beenakker. De ‘ik’ in dit essay is Beenakker zelf.

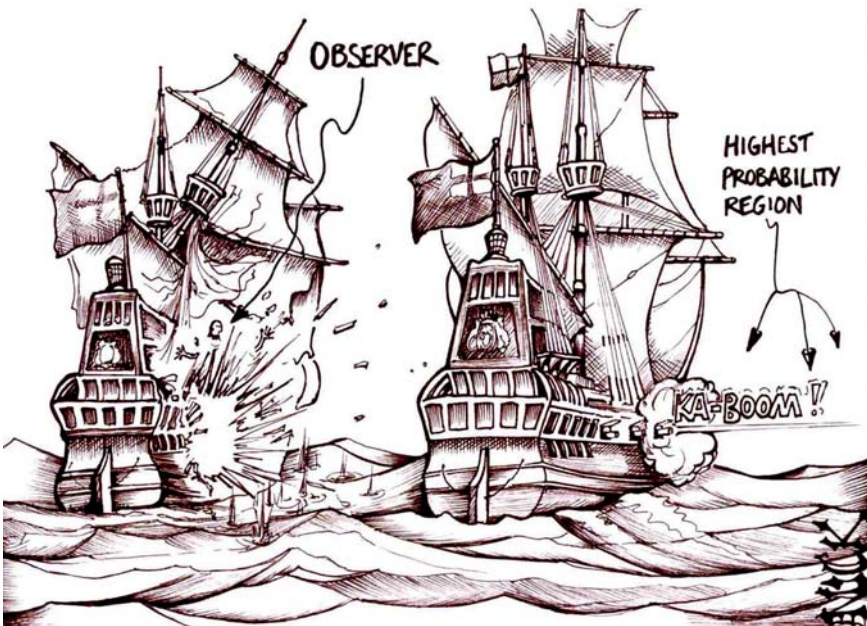
Quantummagie

De quantummechanica is inmiddels ruim een eeuw oud. Antiek, zeg maar. En toch is het zelfs nu nog het meest magische onderdeel van de natuurkunde. Magischer nog dan de relativiteitstheorie. Goed, het feit dat ruimte en tijd onlosmakelijk verbonden zijn, dat sterren en planeten de ruimtetijd indeuken alsof het een trampolinezeil is, en dat klokken langzamer lopen als ze met hoge snelheid bewegen – dat zijn ook nauwelijks voorstelbare zaken die volgen uit Einsteins relativiteitstheorie. Maar de relativiteitstheorie speelt in ons dagelijks leven nauwelijks een rol, de klokcorrecties bij de GPS daargelaten. De technologie van ons dagelijks leven is wél al doordrongen van quantummechanica, hoewel volledig aan onze zintuigen onttrokken. Zonder quantummechanica kenden we geen moderne communicatie- en informatietechnologie. De transistor en de laser zijn de directe vruchten van een quantummechanische wereld waarin zekerheden vervangen zijn door waarschijnlijkheden.

De magie van de quantummechanica zit in een aantal verschijnselen. Neem *superpositie*: het op verschillende plaatsen tegelijkertijd zijn. Theoretisch is het zelfs mogelijk dat een kanon een kogel afvuurt, en dat de kogel vervolgens juist aan de

achterkant van het kanon opduikt in plaats van aan de voorkant.

Beroemd is ook het voorbeeld van *de kat van Schrödinger*: de kat die zowel dood als levend is. Of neem het fenomeen *tunnelen*: in de wereld van de quantummechanica kan een elektron door een ondoordringbare 'muur' heen tunnelen. In de klassieke mechanica is dat volstrekt onmogelijk. Net zo bizar is het verschijnsel *interferentie*: het feit dat licht plus licht gelijk aan donker kan zijn. En dan is er natuurlijk de knotsgekke *teleportatie*: het 'overstralen' hoewel quantummechanische teleportatie wat anders in elkaar zit dan de tv-serie *Star Trek* ons wil doen geloven.



Deze kogel kan zich zowel aan de voorkant van het kanon bevinden, als erachter. Wat volgens ons gezond verstand onmogelijk is, is in de quantummechanica slechts onwaarschijnlijk.

(Illustratie van Nick Kim, *NearingZero.net*.)

Deze ogenschijnlijk magische eigenschappen maken in theorie ook een quantumcomputer mogelijk: een computer die bepaalde rekenklussen die een klassieke computer alleen in honderdduizenden jaren kan oplossen, in enkele seconden kraakt.

Niemand weet nog zeker of er ooit een quantumcomputer komt. Niemand weet zelfs nog hoe zo'n apparaat er moet uitzien. Wordt het een bakje vloeistof, een supergeleidende chip of worden het gevangen genomen lichtdeeltjes of supergekoelde ionen? Het kan nog alle kanten op. De eerste bouwstenen zijn al gerealiseerd, en die bouwstenen hebben ook al de eerste eenvoudige quantumberekening uitgevoerd. Wie weet waar dat nog allemaal toe leidt deze eeuw.

Als de quantumcomputer er ooit komt, dan rekenen we met magische eenheden van informatie die *tegelijktijd* 0 en 1 zijn: quantumbits. Een klassiek bit, zoals onze hedendaagse computers die gebruiken, is altijd alléén 0 of alléén 1. Een quantumbit kan zich in een *superpositie* bevinden van 0 en 1. Eigenlijk schiet ons alledaagse taalgebruik schromelijk tekort om te begrijpen hoe dat kan. Hoezo 0 én 1? Dat kan toch niet!? Het is toch ook niet zo dat het buiten zowel regent als niet regent? Je hebt toch of het een of het ander, maar niet allebei tegelijk? Quantummechanische superpositie doet aan als magie. De vraag naar het *waarom* van dit intuïtief bizarre gedrag is zinloos. Experimenteel blijkt dat de quantummechanische wereld zo in elkaar zit. Dan kan de fysicus niets anders doen dan toegeven.

Hopeloos gebrekkige fantasie

Laat ik van de quantumcomputer even een stap terug doen naar de klassieke computer. De computer zoals we die nu kennen, heeft zijn bakermat in de jaren veertig van de vorige eeuw. In die pioniersperiode deed de voorzitter van IBM, Thomas Watson, de volgende legendarisch geworden uitspraak: "Ik denk dat er een wereldmarkt is voor misschien vijf computers." Tegenwoordig moeten we hard lachen om die opmerking. Bijna elk huishouden in de westerse wereld heeft al meer dan één computer! Watson had echter nooit kunnen voorzien dat we nu een pc hebben als communicatieapparaat, als tekstverwerker, als muziek- en filmmachine, als superencyclopedie, als virtueel reisbureau en winkelpaleis.

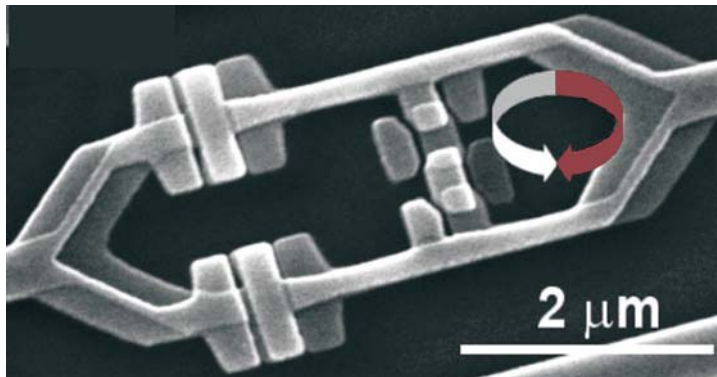
Ik kan me herinneren dat wij op de lagere school – voor mij eind jaren zestig – een opstel moesten schrijven over de wereld van het jaar 2000. Ruim 30 jaar in de toekomst kijken dus. Het knapste hoogstandje dat toen werd verzonnen was een telefoon met een beeldscherm waarop je elkaar ook kunt zien. Zo iets kan tegenwoordig inderdaad, maar veel verder dan een uitbreiding van de bekende telefoon kwam onze toekomstfantasie toen niet.

Internet, met een gigantische berg aan informatie die makkelijk behapbaar aan onze voeten ligt? Er was helemaal niemand die dat in zijn stoutste dromen had verzonnen. Ik denk zelfs dat als iemand toen zo iets als internet wel had verzonnen, het als volslagen magie had geklonken. Trouwens, toen de bedenkers van het internet (die bij het deeltjesfysica-instituut CERN werkten) na hun prille experimenten in Brussel aanklopten voor Europese subsidie, zagen de Europese beleidsmakers daar in eerste instantie niets in. En dat is nog maar een jaar of vijftien geleden, vlak voor de eerste introductie buiten hun eigen lab.

Het punt is dat ons vermogen om te extrapoleren naar de toekomst tekortschiet. Eigenlijk willen we een quantumcomputer begrijpen, maar het niveau van de technische ontwikkelingen ligt niet meer in het verlengde van het speelgoed waarmee we als kind speelden. Dingen als afmetingen, gewicht, snelheid en stevigheid zijn mechanische begrippen die we spelenderwijs hebben oppikt. Een bruggenbouwkundige heeft misschien nog iets aan het gevoel dat hij als kind ontwikkelde, al spelende met blokken of met lego. Maar tegen quantumervaringen lopen we in ons dagelijks leven niet aan. Hoewel...

Natuurkundige en auteur Brian Greene gebruikt de volgende beeldspraak voor het quantummechanische feit dat een eigenschap tegelijk zowel 0 als 1 kan zijn. Hij stelt zich een winkelier voor die twijfelt of hij een dierbaar schilderij aan een geïnteresseerde klant zal verkopen of niet. De winkelier hinkt op twee gedachten. Hij denkt tegelijkertijd 'ja' en 'nee'. Uiteindelijk besluit hij toch het schilderij te verkopen. Terugdenkend heeft de winkelier het gevoel dat hij eigenlijk altijd al wist dat hij het doek zou verkopen. Het 'nee' is verdwenen uit zijn geheugen. Alleen het 'ja' is overgebleven.

Maar als de winkelier daarentegen zou hebben besloten het schilderij niet te verkopen, dan zou juist het 'ja' uit zijn hoofd zijn verdwenen. Het op twee gedachten hinken verdwijnt precies op het moment van de verkoop. Net zoals een quantumbit, dat zich in een superpositie van 0 en 1 bevindt, op het moment van de meting – dat is op het moment dat de quantumcomputer ons het antwoord van een berekening geeft – ook ofwel een 0 ofwel een 1 wordt. Het zou prachtig zijn als zou blijken dat onze associatieve en creatieve denkkraft een quantummechanische oorsprong zou hebben, zoals wiskundige Roger Penrose heeft geopperd, maar daar geloof ik, en velen met mij, niets van. De hersenen werken bij een te hoge temperatuur om de quantummechanica bij de chemische reacties in ons hoofd een rol te laten spelen.



De stroom door dit supergeleidende ringetje loopt tegelijkertijd linksom én rechtsom en kan daarom tegelijkertijd het getal 0 en het getal 1 voorstellen. Op deze 'magische' superpositie is de werking van de quantumcomputer gebaseerd.

(Foto uit de onderzoeksgroep van Hans Mooij, TU Delft.)

Misschien moeten we, als we ons de wereld van over honderd jaar willen voorstellen, ook niet zozeer de huidige stand van zaken extrapoleren, maar eerder te rade gaan bij ideeën die ons nu als magie voorkomen. Neem de fantasiewereld uit de Harry-Potterboeken. Daar figureren twee soorten wezens: de tovenaars, zoals Harry Potter zelf, en de dreuzels, zeg maar de gewone mensen. Elk van die twee heeft zijn eigen technologie. De mensen communiceren per telefoon en reizen per auto. Maar de tovenaars

communiceren via een of andere magische uil, of via brieven die zomaar de brievenbus binnenfladderen. Ze verplaatsen zich door op de ene plaats in een open haard te stappen om totaal ergens anders weer te voorschijn te komen.

Onze wereld van vandaag lijkt wat mij betreft meer op de wereld van die tovenaars dan op de saaie wereld van de dreuzels. We zijn zelfs vertrouwd geraakt met onze magische high-techwereld. We vinden het doodnormaal dat we achter een pc de wereld aan onze voeten hebben. Eigenlijk vragen we ons nooit af hoe dat nou allemaal kan. Hoe kunnen we een bericht versturen, dat zich onderweg vermengt met allemaal andere berichten, die allemaal door dezelfde kabel gaan, en hoe komen al die berichten perfect aan bij de ontvangers? Raakt dat niet allemaal in de war? Niemand snapt dat echt goed. En die paar experts die dat dan wel snappen, begrijpen dan bijvoorbeeld weer niet hoe een vliegtuig in de lucht blijft zweven.

Onvoldoende aangepast brein

Aan de ene kant raken we snel vertrouwd met nieuwe technologie, maar aan de andere kant kunnen we veel van die technologie al lang niet meer uitleggen. Teleportatie, quantumberekeningen, quantumcryptografie – we kunnen het allemaal met wiskundige formules doorrekenen, maar onze intuïtie laat ons in de steek. De werking van een gewone computer kunnen we nog relatief eenvoudig uitleggen. De berekeningen die de pc doet, kunnen we bij wijze van spreken nog zelf op papier maken. Maar een quantumberekening kunnen we zelf niet meer maken omdat we geen quantumrekenaar in ons hoofd hebben zitten.



De werking van een gewone computer kun je heel goed uitleggen aan de hand van een telraam, omdat ze gebaseerd is op de klassieke mechanica in plaats van op de quantummechanica.

Ook de wetenschappers die dagelijks met quantummechanica werken, hebben er geen intuïtie voor. Ze weten hoe ze de wiskunde moeten gebruiken om te voorspellen hoe een quantumstelsel zich gedraagt. Ze stellen vergelijkingen op. Die lossen ze op en zo voorspellen ze hoe de dingen zich gedragen. Maar ook zij kunnen zich er in alle eerlijkheid geen voorstelling van maken.

Onze hersenen zijn eigenlijk blijven steken bij de natuurkunde van de zeventiende en achttiende eeuw, bij de natuurkunde van Newton. Ik denk ook niet dat dat zal veranderen. Toch is onze intuïtie voor de natuurkundige wereld wel ietsje anders dan de intuïtie die de Oude Grieken hadden. Wij snappen bijvoorbeeld dat gewichtsloosheid te maken heeft met vrije val, en dat het niet de afwezigheid van zwaartekracht is. Iedereen die wel eens in een achtbaan heeft gezeten, heeft zich even gewichtsloos gevoeld. We zijn zelfs bekend met beelden vanuit de ruimte waarop we een astronaut een bekertje zien wegduwen dat vervolgens met dezelfde snelheid rechtdoor blijft gaan tot het tegen de wand van het ruimteschip botst. Op aarde is dat allemaal anders door de wrijving, maar Newton en Galilei hebben ons geleerd dat als we een voorwerp dat in beweging is met rust laten, het zich gewoon in een rechte lijn met dezelfde snelheid blijft voortbewegen. Dat idee zou in de Griekse Oudheid heel gek zijn geweest. Aristoteles dacht nog dat alle voorwerpen streven naar rust!

Een andere bescheiden vooruitgang in onze natuurlijke manier van denken zien we in de wiskunde. De Babyloniërs, de Egyptenaren, de Grieken en de Romeinen kenden het getal 0 niet. Het getal 0 is pas in de zevende eeuw in India voor het eerst geïntroduceerd in de wiskunde. Rekenen met het getal nul – daar doen we tegenwoordig niet moeilijk over. En mijn dochter van negen heeft al iets gehoord over negatieve getallen.

Onze intuïtie is dus wel iets veranderd, maar verder dan de Newtonse mechanica zijn we niet gekomen. Einsteins relativiteitstheorie en de bizarre wereld van de quantummechanica behoren niet tot de standaardbagage van ons brein. Einstein zelf zei ooit over onze intuïtie: "Gezond verstand is niets meer dan een bewaarplaats van de vooroordelen die je geest vóór je achttiende heeft opgeslagen." En het is verdraaid lastig, en misschien wel onmogelijk, om de alledaagse wereld die we zien, horen, voelen, ruiken en proeven uit te breiden naar een wereld waarvoor onze zintuigen niet zijn toegerust en waar alleen de wiskunde ons helpt.



Het Yin&Yang-teken symboliseert de quantummechanische superpositie van '0' en '1'. Met dit soort beelden proberen we onze intuïtie voor de quantummechanica te ontwikkelen, maar het blijft een gebrekkige vergelijking. *(De illustratie is het logo van de Delfts-Leidse onderzoeksgroep waarin de spreker werkzaam is.)*

Wetenschap als onderdeel van onze cultuur

Ik heb het gehad over de magie van de natuurkunde en van de technologie. Als ik over 'magie' spreek, dan bedoel ik dat uiteraard als beeldspraak, niet als een serieuze manier om naar de wereld te kijken. Uiteindelijk hoop ik wel degelijk dat een zo groot mogelijk deel van de wereldbevolking het verschil zal weten tussen *magie* en *wetenschap*.

In de wereld van de magie hoeft de mens geen verantwoording af te leggen voor zijn daden. We kunnen wel *hopen* op een magische kracht die het gat in de ozonlaag dicht of die het broeikaseffect repareert, maar dat is valse hoop. Als de mens de wereld verpest, dan moet hij ook zelf de consequenties dragen. Dat is zowel de kracht als de verantwoordelijkheid die de wetenschap ons meegeeft. We kunnen heel veel zaken in onze wereld uitrekenen en uitzoeken. Als we dan op een gegeven moment een antwoord hebben, dan moeten we daar ook zelf iets mee doen. Ook als iets te moeilijk is, en we het niet precies kunnen uitrekenen, dan nog moeten we beseffen dat de wereld wetmatigheden kent die bepalen welke gevolgen uit welke oorzaken voortvloeien.

Het is deze rationele aanpak van de natuurwetenschap die een essentieel onderdeel van onze cultuur is. Neem een zendmast. We kunnen ons de vraag stellen of de straling van een zendmast al dan niet schadelijk is voor mensen. Dat is een vraag die we in elk geval experimenteel kunnen uitzoeken. Een zendmast is niet iets magisch. Het is geen voodooop waar iemand een naald in steekt, waarna er ergens anders op een magische manier iets gebeurt. Nee, we kunnen meten en rekenen aan zendmasten. We weten hoe een zendmast werkt. We kunnen uitzoeken of straling schadelijk is of niet, en vervolgens kunnen we op dat antwoord vertrouwen en daarnaar handelen. Dat is precies de reden waarom we willen dat mensen iets van natuurkunde weten: we willen deze rationele manier van denken laten doordringen in brede lagen van de bevolking.

Het mooie van wetenschap is dat het zich niets aantrekt van de waan van de dag. In de politiek kan een dik rapport van vandaag morgen waardeloos zijn omdat de prioriteiten zijn

veranderd. Politici kunnen allerlei compromissen sluiten over klimaatverdragen, maar de natuur zelf sluit helemaal geen compromissen. De natuur heeft geen weet van onze prioriteitenlijstjes. Zij volgt gewoon haar eigen ingebakken wetmatigheden. Dat zien we goed geïllustreerd als het gaat om veiligheid.

Na de ramp met Space Shuttle *Challenger* in 1986, boog een commissie van politici, astronauten, militairen en één wetenschapper zich over de oorzaken van het ongeluk. Die ene wetenschapper was fysicus en Nobelprijswinnaar Richard Feynman. Hij ging onorthodox en rigoureuus te werk. Vervolgens vond de commissie zijn bevindingen echter zo stuitend voor de NASA dat ze zijn stem wilden wegdrukken. Feynman hield echter voet bij stuk. Zijn verslag kwam uiteindelijk in de appendix van het officiële rapport terecht. En tijdens een op televisie uitgezonden persconferentie demonstreerde hij in een pijnlijk simpel experiment hoe een rubberen ring ging scheuren bij een onderdompeling in een kopje ijswater. Het waren deze rubberen afdichtingsringen die hadden gefaald en het desastreuze ongeluk hadden veroorzaakt.

Ingenieurs hadden gewaarschuwd voor de onbetrouwbaarheid van de afdichtingsringen bij lage temperaturen, maar managers wilden de vlucht, ondanks de lage buitentemperaturen, niet langer uitstellen om gezichtsverlies te voorkomen. Dat was een politieke keuze. Maar de wetenschap laat niet met zich spotten. Feynman besloot zijn schriftelijke verslag over de *Challenger*-ramp daarom met de woorden: "Voor een succesvolle technologie moet de realiteit prioriteit krijgen boven de *public relations*, want we kunnen de natuur niet voor de gek houden."

Blinders in de buik

Sommigen vinden de rationele aanpak van de wetenschap kil. Dan zeggen ze zoiets als dat je liefde niet kunt reduceren tot chemische reacties. Natuurlijk is dat zo, maar daar gaat het niet om. Ook als we de chemie van de liefde tot het allerlaatste molecuul hebben doorgrond, dan nog zullen mensen verliefd worden zoals ze dat

altijd hebben gedaan. En het gevoel van verliefdheid, de vlinders in de buik, zal ook niet veranderen. De subjectieve ervaring van liefde, van geur, van muziek, van de natuur verandert niet als we er wetenschappelijke verklaringen voor hebben. Misschien voegen wetenschappelijke verklaringen zelfs extra schoonheid toe aan onze subjectieve ervaringen.

Een van de grote verworvenheden van de moderne tijd is juist dat we de plaats kennen van verschillende domeinen van onze menselijke vermogens. Vroeger waren wetenschap, filosofie, alchemie, astrologie, kwakzalverij veel meer met elkaar verweven. Isaac Newton was wat dat betreft een van de laatste magiërs. Hij hield zich jarenlang bezig met occulte zaken, met religie en met alchemie voordat hij in 1687 zijn revolutionaire natuurkundige bevindingen publiceerde. Toen heette dat trouwens nog *natuurfilosofie*. Sommige van die oude domeinen zijn inmiddels grotendeels verdwenen. Astrologie en kwakzalverij zijn doodlopende wegen. De filosofie van de Oude Grieken heeft zich vanaf de zeventiende eeuw opgesplitst in wetenschappen als natuurkunde, scheikunde, biologie en astronomie.

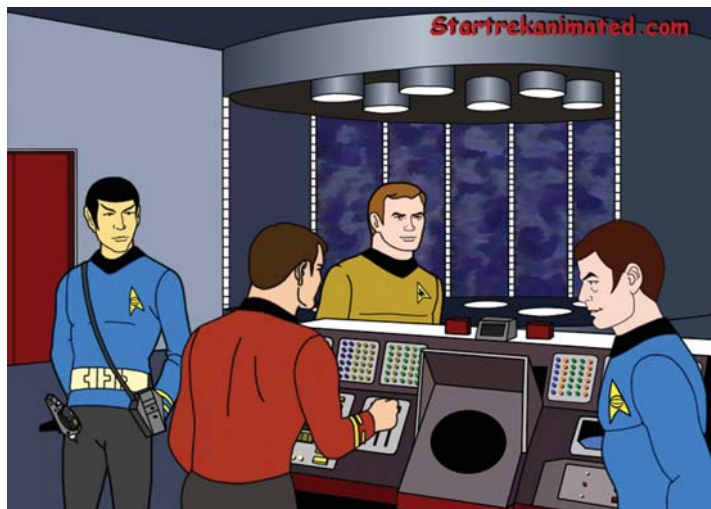
Wat mij betreft zijn er twee grote domeinen overgebleven, die van de wetenschap en die van de religie. De wetenschap gaat over hoe de dingen gebeuren, terwijl de religie gaat over de grote waarom-vragen. Ik wil dan ook nadrukkelijk een onderscheid maken tussen magie en religie. Magie zou ik willen uitbannen (behalve uit de fantasiewereld van boeken en films natuurlijk), maar religie niet. Voor mij staat wetenschap niet tegenover religie. Het zijn twee gescheiden domeinen. Wetenschap heeft geen antwoord op de vraag waarom wij op aarde zijn. De een vindt die vraag totaal oninteressant, en de ander vindt die vraag juist buitengewoon boeiend.

De Nederlandse natuurkundige Hendrik Casimir omschreef natuurkunde als een *benaderende* beschrijving van een *beperkt* gedeelte der fysische verschijnselen, die op hun beurt slechts een *beperkt* gedeelte van onze menselijke ervaringen uitmaken. Een drievoudige relativering van de wetenschap dus, maar dat neemt niets weg van de schoonheid en het grote belang van de wetenschap. De wetenschappelijke manier van denken en de

wetenschappelijke twijfel die daarbij hoort, zijn de basis van een gezonde, moderne samenleving.

Tot slot wil ik nog een laatste keer terug naar de magische technologie. Door de dagelijkse confrontatie met techniek die we met ons gezond verstand niet kunnen vatten, hebben we geen goed gevoel meer voor wat mogelijk is en wat onmogelijk. En dat is toch het wezenlijke onderscheid tussen magie en wetenschap: wetenschap is gebonden aan natuurwetten. Die stellen onverbiddelijk grenzen aan wat kan en wat niet, terwijl toverkunst buiten de natuurwetten staat.

Wie veertig jaar geleden naar een aflevering van Star Trek keek, zal zich evenzeer verwonderd hebben over het overstraalapparaat in het ruimteschip als over de boordcomputer. Wanneer dezelfde aflevering vandaag de dag op de televisie wordt herhaald, dan ziet de boordcomputer er hopeloos ouderwets uit. De werkelijkheid heeft onze toekomstverwachtingen ingehaald. Wie weet welke magische technologie nog eens de overstap naar de wetenschap zal maken.



Teleportatie van mensen, zoals hier in de televisieserie Star Trek, zal waarschijnlijk nooit mogelijk zijn, maar voor afzonderlijke atomen is deze fantasie werkelijkheid geworden.

(Illustratie van Kail Tescar, StartrekAnimated.com.)