

2

WAAROM NIEMAND
KWANTUM BEGRIJPT

Frank
Verstraete

Céline
Broeckaert

EN IEDEREEN ER
TOCH IETS OVER
MOET WETEN

Lannoo

De wereld der atomen
niemand die het ziet.
Hoe ontoereikend zijn onze dromen
als zelfs de verbeelding tekortschiet.
Kwantum was ooit een noviteit
en samen met onze onzekerheid
levert zij thans het bewijs:
de mens die verder kijkt
ziet
meer dan wat in steen gebeiteld staat,
iets wat veel verder reikt.

INHOUD

	Voorwoord van de fysicus	9
	Voorwoord van de schrijfster	11
	Hoe dit boek te lezen	14
I	Wiskunst	17
	1 De onredelijke werkzaamheid van de wiskunde	19
	1.1 Hoe Aristoteles van zijn sokkel werd gestoten	20
	1.2 Wiskunde is de taal van de natuur.....	24
	1.3 Je herkent de leeuw aan zijn klauwen.....	26
	1.4 Algebracadabra.....	32
	2 Symmetrie	39
	2.1 De orde van de chaos.....	40
	2.2 Als de symmetrie breekt	44
	2.3 Groepen: de structuur achter symmetrieën	48
	2.4 Drums en atomen	53
II	Kwantum	59
	3 De (on)waarschijnlijkheid van een deeltje	65
	3.1 De nagel op de kop.....	66
	3.2 Licht: golf én deeltje.....	75
	3.3 De eerste atoommodellen	82
	3.4 Over deeltjes en golfpakketjes	88
	3.5 Twee spleetjes: het experiment	92
	3.6 De microscoop van Heisenberg	95

4	De eerste kwantumrevolutie	99
4.1	Golven vergoelijkt.....	100
4.2	Informatiegolfjes	105
4.3	Twee spleetjes: de theorie.....	107
4.4	Kwantum-tunneling.....	110
4.5	Matrixmechanica.....	111
4.6	Schoonheid is waarheid, waarheid is schoonheid.....	114
4.7	De spin wordt een qubit.....	122
5	Kwantumfilosofie	131
5.1	Kwantumquatsch.....	132
5.2	Verstrengelingen.....	133
5.3	Niels vs. Albert	135
5.4	De EPR-paradox	138
5.5	Schrödinger stuurt zijn kat	143
5.6	Wie de kat de Bell aanbindt.....	147
5.7	Contextualiteit	152
6	Eén, twee, veel	157
6.1	De ononderscheidbaarheid van deeltjes	159
6.2	Hotel Hilbert.....	162
6.3	Atomen en moleculen	172
6.4	De harde materie	188
6.5	Kwantumkleur.....	194
6.6	Over Bose, Einstein en lasers	197
7	Pudding en kwark	207
7.1	Subatomaire fysica: de experimenten	208
7.2	Subatomaire fysica: de theorie.....	226
7.3	We zijn allen gemaakt uit sterren	242
8	Meer is Anderson	249
8.1	Emergentie	250
8.2	Renormaliseren.....	258
8.3	Supergeleiding	260
8.4	De ontdekking van de perfectie	265

9	De tweede kwantumrevolutie	273
9.1	Kwantummeetkunst.....	275
9.2	Kwantumsimulatie.....	277
9.3	Kwantuminformatie.....	280
9.4	Kwantumcomplexiteit.....	284
9.5	Kwantumcomputers.....	291
9.6	Kwantum in de fout.....	294
9.7	Kwantum herdacht: verstrengelde deeltjes.....	298
	Epiloog	312
	Dankwoord	316
	Verklarende woordenlijst	319
	Aanvullende literatuur	323
	Index	325

VOORWOORD VAN DE FYSICUS

Dit boek is ontstaan uit een botsing tussen culturen. Tussen de ideeën van de wetenschap waarin de wereld ‘verwiskundigd’ wordt en daardoor langzaam haar mysteries prijsgeeft, en de schoonheid en verwondering die ons te beurt valt bij de ontdekking van bovenaardse kunst. Tussen de blootlegging van symmetrische patronen in onze materiële wereld en de eenvoud en pracht van de muziek van Schubert. Tussen de onvoorspelbaarheid van een kwantumsysteem en de tegenstrijdige emoties van Narziss en Goldmund.

Het punt is: er is helemaal geen botsing. De vergelijking van Schrödinger behoort evengoed tot de canon van onze cultuur als de negende symfonie van Beethoven. Begrijpen hoe kwantummechanica kleur geeft aan onze wereld is even heerlijk als genieten van de kleurenpracht in de schilderijen van Klimt. Begrijpen hoe symmetrie een centraal organiserend principe is en ervoor zorgt dat we niet ineenkrimpen tot een erwt is even confronterend als het ontwaren van de grootsheid van de Grand Canyon. In essentie ambieert fysica te doen wat Michelangelo zag toen hij het marmeren blok aanschouwde waaruit hij de David tevoorschijn zou toveren: de natuur op zo’n manier bekijken en beschrijven dat al het overbodige materiaal weggebeiteld kan worden en enkel de pure essentie overblijft.

Toch is er een groot verschil: terwijl de hedendaagse kunst en die van honderden of duizenden jaren geleden even waardevol zijn en even sterke emoties losweken, bouwen ze niet echt voort op elkaar. Kunst vindt zichzelf continu opnieuw uit en moet origineel zijn (of niet zijn). Dat geldt niet voor de fysica: hier bouwt de ene theorie voort op de andere. Er is sprake van een natuurlijke progressie waarin de newtoniaanse theorie het onderpit moest delven voor de relativiteitstheorie, en die op haar beurt voor de kwantumveldentheorie; waarin de kwantumwereld van het subatomaire een ware openbaring betekende voor de grote mysteries van de chemie en

alle materie en de werking van de sterren; waarin de alchemie evolueerde tot een experimentele wetenschap waarmee kwik omgezet kan worden in goud. En precies daarom is het verhaal van de kwantumfysica zo boeiend om te vertellen: hoe enkelingen voortbouwen op elkaars ideeën om zo een ware revolutie te ontketenen die alle aspecten van onze kenniswereld op een fundamentele wijze beïnvloed hebben. Hoe enkele basisbegrippen van de kwantumfysica toelaten om eindeloos veel natuurlijke fenomenen te begrijpen.

Het uitgangspunt van dit boek is: kwantumfysica is helemaal niet onbegrijpelijk. Integendeel. Er zijn een aantal basisideeën, zoals symmetrie, het uitsluitingsprincipe of de onzekerheidsrelatie, aan de hand waarvan iedereen voeling kan krijgen met onze atomaire wereld. Met de atomaire wereld die de basis vormt van tal van technologische toepassingen die elk van ons dagelijks gebruikt. De moeilijkheid en de tegenintuïtieve eigenschappen van de fysica mogen niet aangewend worden om haar te mystificeren. Dat is precies het omgekeerde van wat een populariserend boek moet doen. En ook: van een lezer mag niet verwacht worden dat hij/zij alle redeneringen kan volgen. Dat is enkel mogelijk in de wiskundetaal. De filosofie van dit boek is dan ook: laat de lezer focussen op de ideeën, want die zijn veel intuïtiever en belangrijker dan de precieze logische deducties. We willen en kunnen de wiskunde van de kwantumfysica helemaal niet uitleggen in een boek zonder formules, maar dat is ook niet nodig. Wat we willen bereiken is dat de lezer nieuwe dingen ziet en voelt en na het lezen van dit boek naar de wereld kijkt vanuit een fris kwantum perspectief.

Kwantumfysica werkt en we staan aan de vooravond van een tweede kwantumrevolutie die onze technologie ingrijpend zal veranderen. Iedereen die geïnteresseerd is in de werking en schoonheid van onze wereld moet op zijn minst de basisbegrippen van kwantum kennen. Dat is de missie van het boek.

VOORWOORD VAN DE SCHRIJFSTER

Op school heeft niemand mij ooit de zin van wiskunde kunnen uitleggen. ‘Waarom moeten wij dat leren, mevrouw? Ik ga dat later toch nooit nodig hebben.’ Het eeuwige riedeltje, je kent het wel, waarop ik gefrustreerd en vol colère wegliep en me immer moedig optrok aan de poster die boven mijn bed aan de muur was gespijkerd: Do not worry about your difficulties in mathematics, I assure you that mine are greater. Getekend: Albert Einstein. Diegenen onder ons die niet gezegend waren met de goddelijke wiskundigheid, spiekten het denkwerk van hun buurman bij elkaar, en tegen de schoolvakantie was alles vergeven – en ook weer vergeten. Zelf vergaarde ik mijn punten met boekbesprekingen, opstelletjes en spreekbeurten, want daar kon mijn talenknobbel tenminste wel iets mee.

Ik vond het vooral frustrerend dat ik niet begreep *waarom* ik niets snapte van die wiskunde. Vandaag begrijp ik dat wiskunde niet zo anders is dan volzinnen, maar dan in een andere taal. Wiskunde heeft haar eigen regels en poëzie; het is de beste oefening voor ons abstractievermogen, voor ons vermogen om de juiste vragen te stellen, probleemoplossend te (leren) denken en verbanden te leggen. Zoals Newton, die aan de hand van een en dezelfde formule kon verklaren waarom zijn appel niet ver van de boom viel en waarom planeten in banen tolleren rond de zon.

Is het dan echt zo noodzakelijk om te weten hoe alles in mekaar zit? Nee, uiteraard niet. Is het een must? Natuurlijk wel. Ons punt is: kwantumfysica maakt een onmiskenbaar deel uit van onze cultuur, net zozeer als literatuur, muziek, theater, film en *tutti quanti* dat doen, omdat cultuur gelijkstaat aan kennis. Het is de vertaling van hoe wij als mens evolueren, hoe wij omgaan met onze geschiedenis, hoe wij ons verhouden tot het oneindig grote en het oneindig kleine, en tot alles wat we doen en alles waar we geen vat op hebben. Aan de cultuur ontlene we onze identiteit. En, wie denkt aan identiteit, denkt aan geschiedenis. En achter alle kantelpunten in de geschiedenis staat een sterke man of vrouw, maar ook een

sterk idee. En die ideeën zijn vrijwel allemaal tot stand gekomen als gevolg van nieuwe inzichten in de natuurwetenschappen (denk maar aan de Verlichting, de industrialisering, de automatisering, de globalisering, de digitalisering). Stiekem hopen we dus dat de aan de middelbare school afstuderende jeugd dankzij (of ondanks) dit boek in groten getale kiest voor een wetenschapsrichting. Zeker ook de vrouwen onder ons. Niet vanwege hun sekse, maar natuurlijk ook wel vanwege hun sekse. Want meisjes en vrouwen zijn onwaarschijnlijk goed in wiskunde en wetenschappen. Dit boek levert daar het harde bewijs voor.

Onwillekeurig moet ik hier denken aan mijn afstudeerthesis, die handelde over de vertaling van de *Feuillets d'Hypnos* van René Char naar het Italiaans. Ik had dat boekje ooit ergens gelezen, maar net als de vertaler begreep ik er aanvankelijk maar weinig van. Het leek vooral onnodig moeilijk Frans. En toch. Chars aforismen achtervolgden mij. Ergens kon ik me niet van het gevoel ontdoen dat hij in elk van zijn teksten tot de essentie kwam. Tot ik, na maanden zoeken en proberen begrijpen, van de ene aha-erlebnis in de andere viel. Dus dát bedoelde hij! Stomweg, door heel banale dingen die gebeurden in het dagelijkse leven, legde ik opeens verbanden die ik anders niet zag en ontdekte ik wat hij precies wilde zeggen. Maar dat was – ere wie ere toekomt – deels ook te danken aan de meesterlijke vertaling. Niet alles, maar veel viel daarmee in zijn plooi. Veel werd duidelijk. Ik had me die aforismen onbewust eigen gemaakt en meer en meer begon ik de dingen door die bril te zien, en kwam ik tot de kern.

Het zou klef zijn hier te beweren dat ik sinds het schrijven van dit boek met wiskundeformules in mijn achterhoofd de plaatselijke supermarkt afschuim op zoek naar een potje yoghurt. Maar wanneer ik met dat potje yoghurt aan de zelfscan sta, herinner ik me wel het hoofdstuk over lasers. Wanneer ik naar huis sms dat ik een klein beetje later zal zijn, dan herinner ik me de paragraaf over transistoren. En als ik bedenken dat mijn moeder al meer dan twintig jaar kankervrij is, dan ben ik als een kind zo blij dat er MRI-scanners bestaan en dat ik haar op het scherm van mijn computer kan zien terwijl we, elk op een ander continent, bellen via Skype. Alles krijgt nog meer betekenis als je weet hoe alles in elkaar zit. En of we het nu te danken hebben aan een poëet of aan een kwantumprofessor, wat telt zijn de waarde en de betekenis die we toekennen aan alles wat ons omringt, de manier waarop we anders leren denken, en die ons doet groeien.

Tot slot nog over mijn samenwerking met Frank. Ik dacht dat ik op een heel andere manier dacht dan de professor, veel gevoelsmatiger, of toch niet op die rechtlijnige zwart-witmanier die (schijnbaar) inherent is aan de wetenschap en de wiskunde. Ik werk, leef en denk vooral intuïtief. Voor mij is het leven een aaneenschakeling van verrassingen en ontmoetingen, met veel ruimte voor toeval. Door naar de professor te luisteren, stelde ik vast dat wij helemaal niet zo veel van elkaar verschillen. Eigenlijk zijn we in ons denken gelijk en worden we geraakt door dezelfde drang naar schoonheid. Frank leeft niet minder dan ik vanuit een passie voor dingen die onze levens verrijken en boeiend maken. Beiden zijn we even chaotisch en creatief en doen we wat we doen vanuit een gevoel van urgentie en de goesting om ons hebben en houden te delen met anderen. Alleen uiten we dat op een totaal verschillende manier. Net dat maakte het zo leuk, en zo nodig, om samen te werken. Het dwong ons om nog beter te luisteren (naar elkaar), om ons nog meer te verplaatsen (in elkaar), om nog beter te proberen om elkaar te begrijpen. Het is een kwestie van elkaar aanvoelen en aanvullen. Precies door de juiste vragen te stellen en de juiste verbanden te leggen, vullen wij elkaar zo goed aan. De professor is dom omdat hij het niet kan uitleggen? Ik ben dom omdat ik het niet begrijp? Welaan! Het verschil is: Frank denkt en spreekt wiskunde, ik denk en spreek Nederlands.

Tegelijk is het allemaal relatief. Er is de wiskunde, er is de kwantumfysica, er zijn formules en verstrengelingen, maar er zijn andere dingen in het leven die veel ingewikkelder zijn. In het dagelijkse leven moeten we leren om conflicten uit te praten en woorden te vinden voor gevoelens en gedachten. In diezelfde mate zoeken we hier naar woorden, proberen we dingen te vatten. Wat wij hier neerschreven, moest niet alleen kloppen en duidelijk zijn, maar ook mooi. Kennis is overdraagbaar, maar ze mag ook aanstekelijk zijn. Ik hoop dat die boodschap ook bij jou aankomt, en dat je vooral niet *koleirig* of gefrustreerd wegloopt. Is het onderwerp na deze leetuur toch nog niet helemaal duidelijk, weet dan: dat is niet meer dan normaal. Moge het dan op zijn minst plezierig zijn geweest om te lezen. En als je niet alles meteen begrijpt: wacht maar tot die aha-erlebnis er komt!

Juni 2023, Gent & Cambridge & Nyons
Céline Broeckaert & Frank Verstraete

HOE DIT BOEK TE LEZEN

Wat volgt is geen fysicaboek. Het is een boek óver kwantumfysica. De essentie van kwantumfysica is immers niet de wiskunde. Belangrijker zijn de achterliggende ideeën. We hebben ons verhaal daarom zo veel mogelijk ont-cijferd, in de zin van: van formules en wiskunde ontdaan. Je moet niet alles wat hier staat geschreven begrijpen. Staar je niet blind op de complexiteit van bepaalde passages. De kwantumlogica is heel tegenintuïtief en soms onmogelijk te vatten. Ze is geen voorwaarde om het bredere plaatje te begrijpen, noch om de schoonheid van de wetten van de natuur te appreciëren. Weet dat zelfs kwantumfysici de kwantumfysica niet helemaal begrijpen. Maar ze leren er wel mee werken en leven. Laat je meevoeren door de golven. Beeld je in dat je naar muziek luistert. Ieder hoofdstuk ontwikkelt een variatie op het kwantummotief. Muziek begrijp je ook nooit helemaal, maar je kunt er wel van genieten.

De structuur van het boek

Dit boek handelt over de kwantumfysica en over haar ontstaan, begin twintigste eeuw; over hoe ze evolueerde tot de grootste revolutie ooit in onze pogingen om alle materie op aarde en in het heelal te doorgronden; over hoe ze vorm geeft aan een groot deel van onze moderne technologie. Echter, net als elk domein in de wetenschappen is de kwantumfysica een hoofdstuk in een verhaal zonder einde en zonder echt begin. Want hoe ver moet je teruggaan in de geschiedenis om de eerste aanzet te vinden tot deze natuurwetenschap? Wij kozen ervoor om ons verhaal te laten aanvangen in de zestiende eeuw, met Simon Stevin van Brugghe, de eerste die wetenschappelijke dogma's overboord gooide omdat experimenten hem op andere, tegenintuïtieve waarheden wezen. De kwantumfysica is ontstaan door de kennis die, sinds Stevin, estafettegewijs werd doorgegeven, generatie op generatie, om zo vorm te krijgen en zich gaandeweg onmisbaar te maken in tal van dagelijkse toepassingen. Dat is de rode draad.

Naast de hoofdtekst bevat het boek nog twee soorten kaderstukjes:

Voor de goede orde: dit zijn de stukjes tekst met een verticale streep naast. Ze laten hier en daar wat frisse wind door de lectuur waaien.

Voor de aficionado's: dit zijn de omkaderde stukjes tekst. Voor wie toch een beetje dieper wil graven en zich graag door cijfers en formules laat bedwelmen. Wees gerust, deze zijn niet noodzakelijk om de hoofdtekst te kunnen volgen.

DEEL

1

WISKUNST

Hoofdstuk 1

in een notendop:

- Een theorie staat of valt met experimenten.
- Wiskunde is de taal van de natuur (en is onredelijk werkzaam).
- Fysica gaat over concepten en ideeën (niet over wiskunde).
- Hoofdpersonages: Simon Stevin, Galileo Galilei, Isaac Newton, William Hamilton.

HOOFDSTUK 1

DE ONREDELIJKE WERKZAAMHEID VAN DE WISKUNDE



Simon Stevin

Het begon allemaal met een ogenschijnlijk onbenullig experiment, uitgevoerd door twee mannen die in de zestiende eeuw de klokkentoren van Delft waren opgeklauterd. Hun valproef luidde het begin in van een ongeziene en alles ontwrichtende wetenschappelijke revolutie. Daarbij viel niet alleen Aristoteles van zijn sokkel, maar ook het duizenden jaren oude en ongenaakbare geloof in de stelling dat zware objecten sneller neervallen dan hun lichtere soortgenoten.

Het tafereel in Delft voltrok zich als volgt: twee visionaire koppen, Simon Stevin van Brugghe (1548-1620, Bruggeling, wiskundige, fysicus, ingenieur avant la lettre en meester-twijfelaar) en zijn vriend Jan Cornets de Groot ('vlietichste ondersoucker der Naturens verborghentheden'¹) begaven zich anno 1586 richting de top van de toren van de Nieuwe Kerk in Delft, voorzien van twee loden ballen, 'd'een thienmael grooter en swaerder als d'ander'. De ballen lieten ze, 'van 30 voeten hooch', tegelijk naar beneden vallen. Over wat er vervolgens gebeurde met hun 'loyen cloten' noteerde Stevin 'dat de lichtste bal niet tien keer langer onderweg is dan de zwaarste, maar dat ze tegelijkertijd op de grond vallen'.

1 Omschrijving door Simon Stevin. Uit *Anhang van de weeghconst, inde welcke onder anderen weerleydt worden etliche dwalinghe ghedaenten*.