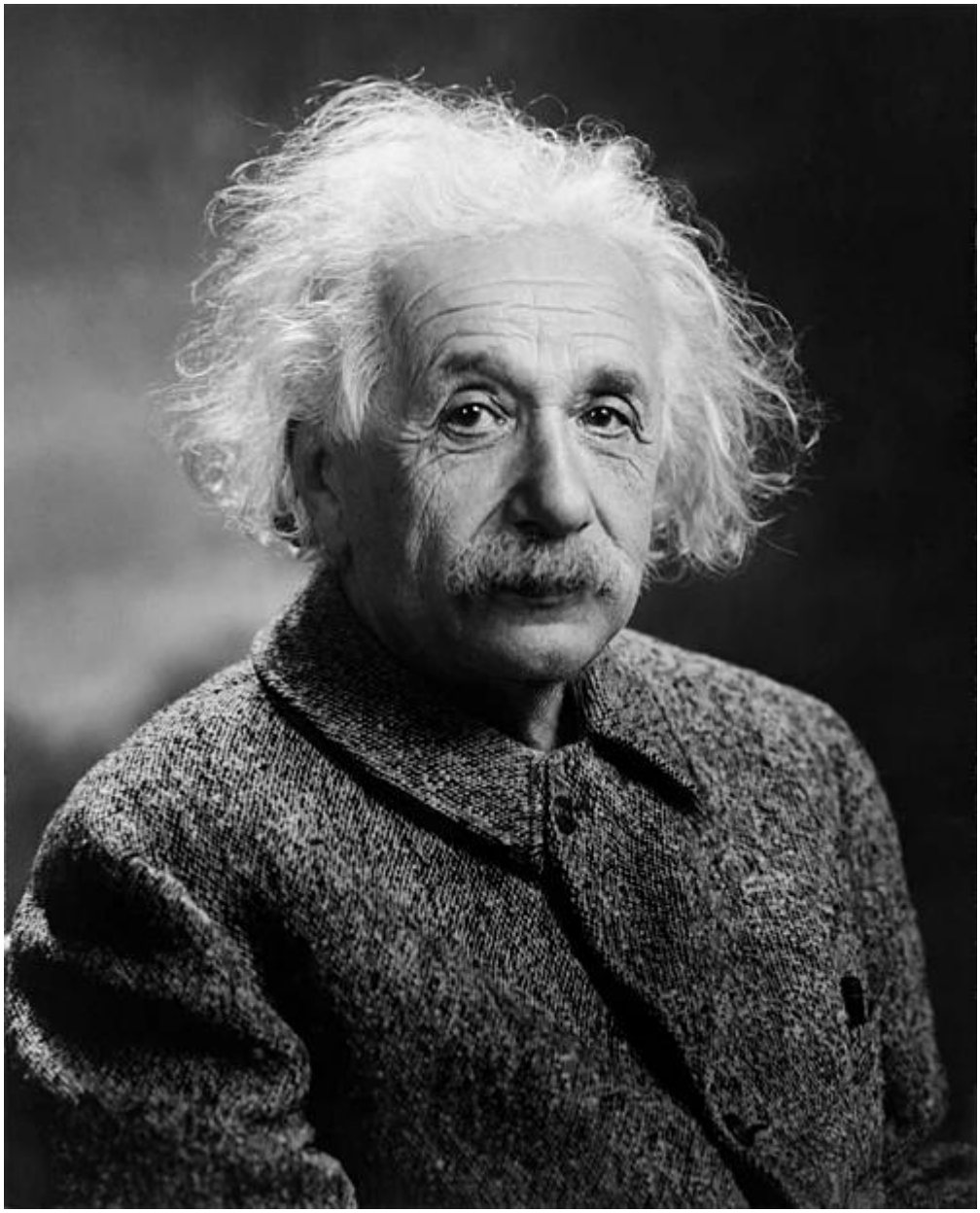
Quantumpioniers (3): Albert Einstein

In de serie ‘quantumpioniers’ worden het leven en het werk van een aantal van de belangrijke natuurkundigen die hebben bijgedragen aan de ontwikkeling van de quantummechanica uitgelicht. In dit artikel ontdek je hoe Albert Einstein naast zijn beroemde relativiteitstheorie ook grote bijdragen leverde aan het ontstaan van de quantummechanica.



Albert Einstein in 1947. Naast zijn werk aan de relativiteitstheorie

leverde Albert Einstein ook belangrijke bijdragen aan de ontwikkeling van de quantummechanica. Afbeelding: Orren Jack Turner, via Wikimedia Commons.

In het vorige artikel in deze reeks besprak Jort de Groot het leven en het werk van Max Planck. Planck deed onderzoek naar zwarte stralers: objecten die geen enkel licht weerkaatsen maar bij opwarming wel zelf licht uitstralen. In het jaar 1900 wist Planck als eerste een theoretische verklaring te geven voor het in experimenten gemeten spectrum – de hoeveelheid licht van elke golflengte die wordt uitgezonden – van deze zwarte stralers. In zijn werk deed Planck de aanname dat energie niet elke willekeurige waarde kan aannemen, maar alleen voorkomt in vaste "energie-elementen". Deze aanname van *quantisatie* leverde hem later de bijnaam "vader van de quantummechanica" op.

Toch zijn niet alle historici het erover eens of Planck degene was die de quantummechanica inluidde. Zo beargumenteerde wetenschapshistoricus en -filosoof Thomas Kuhn in de jaren zeventig dat Planck ten tijde van zijn berekening niet écht geloofd had dat energie alleen specifieke, discrete waarden aan kon nemen. De quantisatie van energie zou slechts geïntroduceerd zijn als hulpmiddel in de berekeningen. Het zou niet Planck maar Einstein zijn geweest die de sprong van continue naar discrete energie maakte, met zijn voorstel dat licht bestaat uit "energiequanta".

Albert Einstein

Albert Einstein werd op 14 maart 1879 geboren in de Duitse stad Ulm, als oudste kind van Hermann en Pauline Einstein. Niet veel later verhuisde de familie naar München, waar Alberts vader en zijn oom Jakob een elektrotechnisch bedrijf begonnen. Al op jonge leeftijd bleek Albert een nieuwsgierig en leergierig kind. Een veel genoemd voorbeeld is dat hij op zijn vijfde gefascineerd raakte door de werking van een kompas. Toch verliep zijn schooltijd niet altijd even soepel, doordat hij moeite had met het strenge onderwijssysteem in München. Toen het familiebedrijf failliet ging, verhuisde de familie naar het Italiaanse Pavia. De op dat moment vijftienjarige Albert bleef in eerste instantie achter in München om zijn middelbare school af te maken, maar verhuisde enkele maanden later alsnog – zonder diploma – naar Italië.

In 1896 deed Einstein toelatingsexamen voor de Eidgenössische Technische Hochschule

(ETH) in Zürich. Hoewel hij uitblonk in de exacte vakken, slaagde hij aanvankelijk niet voor het volledige examen. Hierna rondde hij alsnog zijn middelbare school af in het Zwitserse Aarau, en werd een jaar later toeglaten tot de opleiding tot leraar wis- en natuurkunde. In hetzelfde jaar begon ook Mileva Marić, als enige vrouw in het jaar, aan deze opleiding. Al snel ontwikkelde zich tussen Einstein en Marić een hechte vriendschap, die later uitgroeide tot een romance. In 1902 kregen ze een dochter, Lieserl, over wie weinig met zekerheid bekend is. Mogelijk werd zij ter adoptie afgestaan of stierf zij op jonge leeftijd. Einstein en Marić trouwden in 1903 en kregen daarna nog twee kinderen, de zoons Hans Albert en Eduard.



Einstein met zijn vrienden Conrad Habicht en Maurice Solovine. In Bern raakte Einstein (rechts) bevriend met gelijkgestemden, waaronder Conrad Habicht (links) en Maurice Solovine (midden). Samen vormden ze een discussiegroep waarin gesproken werd over filosofie en natuurkunde. Ze noemden de groep spottend de ‘Akademie Olympia’. Afbeelding: Emil Vollenweider und Sohn, via Wikimedia Commons.

Na zijn afstuderen kon Einstein niet direct een baan als docent vinden. Uiteindelijk ging hij aan de slag bij een patentbureau in Bern, waar hij octrooiaanvragen voor technische uitvindingen beoordeelde. Hier was hij geïsoleerd van andere natuurkundigen, maar het

octrooiwerk liet Einstein voldoende tijd voor eigen onderzoek – naar eigen zeggen meer dan toen hij later wél in dienst was van een universiteit. Zijn eerste wetenschappelijke artikelen, gepubliceerd tussen 1901 en 1904, gingen over problemen uit de thermodynamica en statistische mechanica. Onder begeleiding van Alfred Kleiner promoveerde hij op onderzoek naar de bepaling van de grootte van moleculen met behulp van hydrodynamica. Zulke berekeningen waren eerder al gedaan voor gassen, maar Einstein was de eerste die erin slaagde het probleem op te lossen voor vloeistoffen. Het proefschrift werd gepubliceerd in april 1905 en groeide dankzij zijn brede toepasbaarheid – onder meer in zuivelproductie en betonmenging – uit tot een van Einsteins meest geciteerde werken.

Toch is dit artikel vandaag veel minder bekend dan enkele andere publicaties uit datzelfde jaar. In 1905, later bekend geworden als zijn *annus mirabilis* of *wonderjaar*, publiceerde Einstein vier artikelen die een enorme invloed hebben gehad op de moderne natuurkunde. In het eerste artikel – dat hieronder nog in meer detail aan bod komt – besprak hij het *foto-elektrisch effect*: het fenomeen dat elektronen vrij kunnen komen uit een metaal wanneer ze voldoende licht opnemen. In hetzelfde jaar gaf hij een verklaring voor de *Brownse beweging*: de willekeurige beweging van deeltjes in een gas of vloeistof die een gevolg is van botsingen met atomen of moleculen. Ook publiceerde hij zijn speciale relativiteitstheorie én leidde hij daaruit de beroemde vergelijking $E = mc^2$ af, waarmee hij een verband legde tussen massa en energie.

Einsteins wetenschappelijke reputatie groeide snel. Via academische posities aan verschillende universiteiten kwam hij in 1914 uiteindelijk terecht in Berlijn. Marić kon hier niet wennen en verhuisde met de kinderen terug naar Zwitserland. Uiteindelijk scheidden zij en Einstein in 1919 van elkaar. Op wetenschappelijk vlak ging het beter voor Einstein. In 1915 presenteerde hij zijn algemene relativiteitstheorie, waarin hij zwaartekracht beschreef als een vervorming van ruimte en tijd door massa. Deze theorie voorspelde onder andere dat licht afbuigt rond zware objecten, iets wat in 1919 experimenteel werd bevestigd tijdens een zonsverduistering. Het nieuws haalde vele kranten en Einstein groeide uit tot symbool van wetenschappelijke genialiteit.

Naast zijn wetenschappelijke werk sprak Einstein zich ook steeds vaker uit over politieke kwesties. Zijn uitgesproken pacifisme, in combinatie met zijn Joodse afkomst, zorgde ervoor dat Einstein na Hitlers machtsovername in 1933 niet langer in Duitsland kon blijven. Hij

vestigde zich in de Verenigde Staten, waar hij een positie kreeg aan het Institute for Advanced Study in Princeton. Einstein bleef tot hoge leeftijd actief in de wetenschap. Zelfs op de laatste dag van zijn leven vroeg hij of zijn schrijfmaterialen naar het ziekenhuis gebracht konden worden, zodat hij verder kon met zijn werk. Een groot deel van zijn latere werk wijdde hij aan pogingen om zwaartekracht en elektromagnetisme te verenigen tot één theorie – een ambitie die hij niet zou bewerkstelligen. Albert Einstein overleed op 18 april 1955.

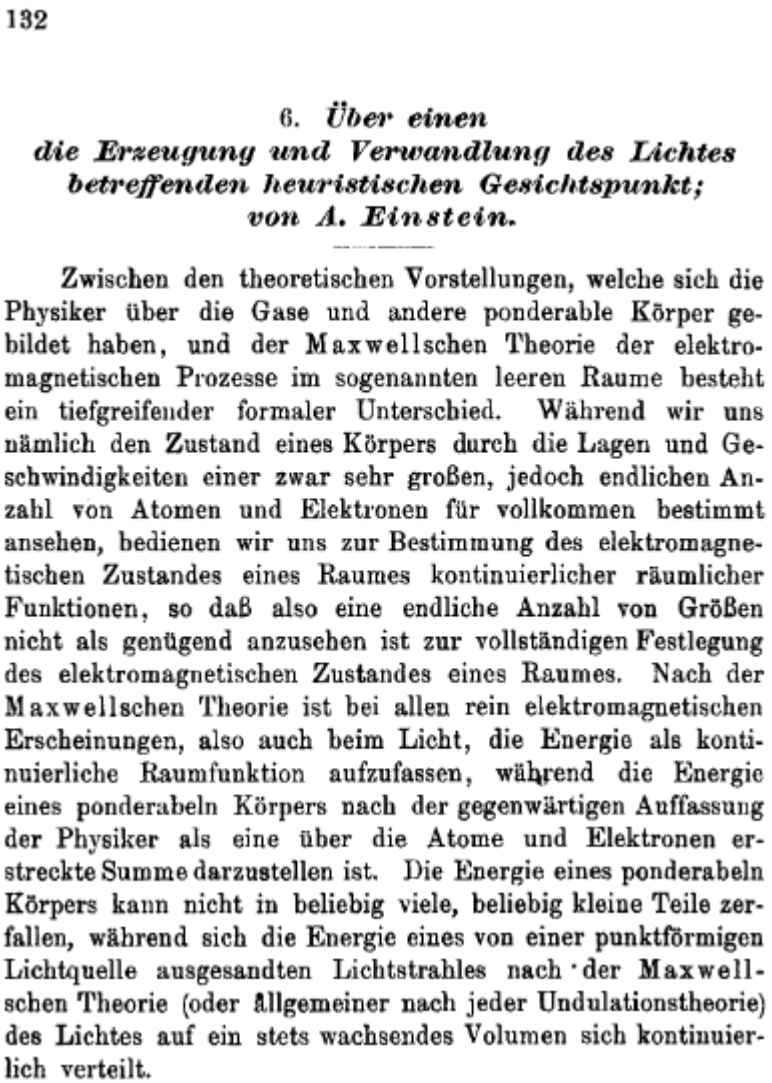
Het werk van Einstein

Zoals hierboven al besproken, werd Einstein wereldberoemd door de ontdekking van de relativiteitstheorie, maar leverde hij ook cruciale bijdragen aan de ontwikkeling van de quantummechanica – een theorie waar hij zich later juist kritisch over uitliet. Gezien de grote omvang van Einsteins werk, vind je in wat volgt zeker geen compleet overzicht, maar wel een aantal momenten waarop Einsteins ideeën de ontwikkeling van de quantummechanica een belangrijke zet gaven.

We beginnen in 1905, enkele jaren na Plancks berekening van het spectrum van zwarte stralers. Hoewel Planck in zijn berekening de energie opdeelde in energie-elementen, die slechts bepaalde waarden konden aannemen, interpreteerde hij die opdeling niet als een fundamentele eigenschap van het licht zelf. De heersende opvatting onder natuurkundigen in die tijd was dat licht een elektromagnetische golf is, zoals volgt uit de theorie van Maxwell. Einstein was zich er dan ook zeer van bewust dat hij revolutionaire ideeën presenteerde toen hij in maart 1905 een andere theorie over licht voorstelde. In zijn artikel benadrukt hij eerst dat de golftheorie uitstekend werkt als verklaring van verschijnselen als interferentie (het elkaar versterken of uitdoven van twee of meer golven) en diffractie (het afbuigen van golven door een nauwe opening). Maar vrijwel direct daarna draait hij het perspectief om: licht gedraagt zich, in elk geval in bepaalde situaties, alsof het bestaat uit afzonderlijke pakketjes energie – “energiequanta”.

Gebaseerd op het statistische werk van Ludwig Boltzmann bestudeerde Einstein de entropie van elektromagnetische straling. Uit zijn berekeningen concludeerde hij dat straling zich gedraagt alsof ze bestaat uit deeltjes met een energie evenredig aan de frequentie van de golf: $E = h\nu$, met h de constante van Planck en ν de frequentie. De “alsof” is daarbij belangrijk: Einstein bewees niet dat licht echt uit deeltjes bestaat, maar liet zien dat

je veel fenomenen kunt begrijpen als je dit aanneemt. Hij werkte drie toepassingen uit, waaronder de verklaring van het foto-elektrisch effect. Bij dit effect, ontdekt door Heinrich Hertz in 1887, ontsnappen elektronen uit een metaal wanneer er licht op het metaal valt. In de klassieke golftheorie is dat lastig te begrijpen. Einstein stelde dat ieder lichtquantum zijn energie in één keer overdraagt aan een elektron. Pas als de frequentie van het licht – en dus de energie van het quantum – hoog genoeg is, kan het elektron uit het metaal ontsnappen. Voor dit werk kreeg hij in 1921 uiteindelijk de Nobelprijs.



132

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;* von A. Einstein.

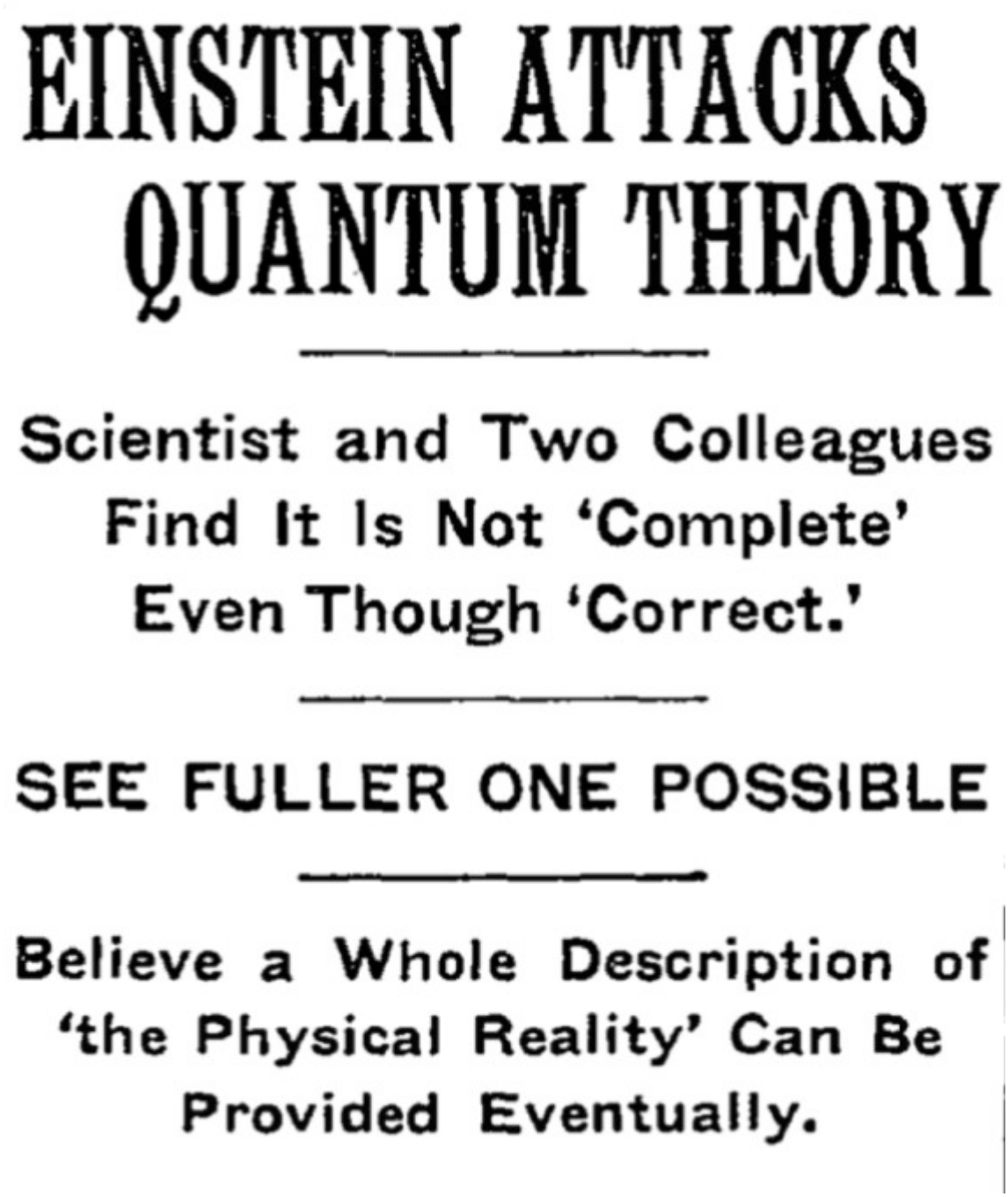
Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderabeln Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderabeln Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Einsteins artikel uit maart 1905. “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, oftewel “Over een heuristisch oogpunt over de creatie en transformatie van licht”. Bron: Analen der Physik, 1905.

Einsteins lichtquanta werden aanvankelijk weinig serieus genomen. Dat veranderde in de jaren twintig van de vorige eeuw. Een belangrijke stap hierin was de ontdekking van het Compton-effect. Tijdens experimenten met röntgenstraling werd geobserveerd dat straling na botsing met atomen verstrooid wordt en verandert van golflengte. Ook dit kon niet verklaard worden met de klassieke golftheorie van elektromagnetische straling. Arthur Holly Compton liet in 1923 zien dat het wél verklaard kon worden door aan te nemen dat de straling is opgebouwd uit lichtdeeltjes – later fotonen genoemd – die tegen de elektronen botsen.

Einstein probeerde het deeltjesbeeld van licht verder te testen met experimenten die hij in 1926 voorstelde aan de experimenteel natuurkundige Emil Rupp. Deze experimenten moesten uitwijzen of het uitzenden van licht een langer durend proces is – zoals je voor golven verwacht – of vrijwel instantaan gebeurt. De resultaten van Rupp leken Einsteins visie te bevestigen. Een decennium later werd Rupp echter betrapt op fraude in ander werk, waardoor hij gedwongen werd artikelen over dit werk terug te trekken. Sindsdien zijn er sterke aanwijzingen gevonden die aannemelijk maken dat ook in de Einstein-Ruppexperimenten is gefraudeerd. In historische overzichten van de quantummechanica spelen deze experimenten daarom nauwelijks meer een rol, al is het goed mogelijk dat ze destijds wél invloed hebben gehad op de ontwikkeling van ideeën, zoals Max Borns probabilistische interpretatie van de golffunctie en Werner Heisenbergs onzekerheidsprincipe. Op deze ontwikkelingen zullen we in later artikelen in deze serie dieper ingaan.

Zelf hield Einstein zich in die tijd ook bezig met het werk van de Indiase natuurkundige Satyendra Nath Bose. Bose had een nieuwe manier gevonden om de wet van Planck af te leiden door gebruik te maken van een statische beschrijving van een gas van lichtdeeltjes. Zijn werk werd door het wetenschappelijke tijdschrift “Philosophical Magazine” afgewezen voor publicatie, waarna hij het naar Einstein stuurde met het verzoek om het naar het Duits te vertalen en aan te bevelen voor publicatie. Einstein zag direct hoe krachtig Boses aanpak was, en breidde het werk uit van licht naar alle deeltjes waarvan de spin een geheel getal is – tegenwoordig bosonen genoemd. Hij ontdekte dat de bosonen bij extreem lage temperaturen één collectieve laagste-energietoestand vormen: een *Bose-Einsteincondensaat*. De temperaturen waarbij dit verschijnsel zou optreden lagen toen nog ver buiten het bereik van de experimenten die werden gedaan: pas in 1995 werd voor het eerst een Bose-Einsteincondensaat gemaakt in een laboratorium.



EINSTEIN ATTACKS
QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

Krantenkop uit de New York Times (1935). Krantenartikel naar aanleiding van de publicatie van Einstein, Podolsky en Rosen. Afbeelding: Wikimedia Commons.

Opmerkelijk genoeg werd Einstein zelf steeds minder tevreden met de vorm die de quantummechanica in de jaren twintig en dertig aannam. De theorie, zoals verder ontwikkeld door onder anderen Heisenberg, Schrödinger en Born, introduceerde een fundamenteel toeval in de theorie van de quantummechanica: je kunt alleen de kans uitrekenen op bepaalde meetuitkomsten, niet de uitkomst zelf. Het ongemak van Einstein wordt vaak

samengevat in de uitspraak “God dobbelt niet”, al is dit waarschijnlijk een parafrase. Zijn kritiek bereikte een hoogtepunt in 1935, toen hij samen met Boris Podolsky en Nathan Rosen een gedachte-experiment publiceerde dat nu bekendstaat als de “EPR-paradox”. In dit experiment zijn er twee deeltjes met elkaar verbonden in een bijzondere quantumtoestand – tegenwoordig noemen we zo’n toestand *verstrengeld*. Meet je de toestand van het ene deeltje, dan lijkt de toestand van het tweede deeltje onmiddellijk vast te liggen, hoe ver de twee deeltjes zich ook van elkaar bevinden. Dit was in strijd met Einsteins relativiteitstheorie, omdat een oorzaak op de ene plek sneller dan het licht een gevolg op een andere plek lijkt te veroorzaken. Einstein suggereerde daarom dat de theorie van de quantummechanica nog niet compleet was: er moesten verborgen variabelen zijn die de informatie over de meetuitkomst al vanaf het ontstaan van de deeltjes met zich mee zouden dragen. Experimenten vanaf de jaren zeventig lieten echter al zien dat geen enkele theorie met verborgen variabelen alle voorspellingen van de quantummechanica kan reproduceren, en in de afgelopen decennia is dat bewijs nog verder verstevigd, mede door Nederlandse inbreng.

Einsteins naam duikt in dit verband ook in de 21e eeuw weer op, in het bijzonder in de *ER = EPR-hypothese*. De letters “ER” staan hier voor Einstein en Rosen, die in hetzelfde jaar als de samenwerking met Podolsky nog een heel ander artikel publiceerden: een oplossing van de relativiteitstheorie die een *wormgat* beschrijft. Zo’n wormgat is een soort brug die twee ver van elkaar verwijderde gebieden in het heelal met elkaar kan verbinden. De hypothese is dat zulke wormgaten en quantumverstrengeling twee kanten van hetzelfde verschijnsel zijn. Of dat waar is, weten we niet, maar het illustreert hoe Einsteins bijdragen aan de quantummechanica – en natuurlijk zijn relativiteitstheorie – nog altijd nieuwe ideeën inspireren.

Wie meer wil lezen over Einsteins wonderjaar 1905 en zijn introductie van lichtquanta, kan dat doen in het boek “Einstein 1905” van John Rigden. Voor Einsteins latere werk was “The Cambridge Companion to Einstein” een belangrijke bron voor dit artikel. Deze en andere waardevolle bronnen werden mij aangeraden door Jeroen van Dongen, waarvoor veel dank.