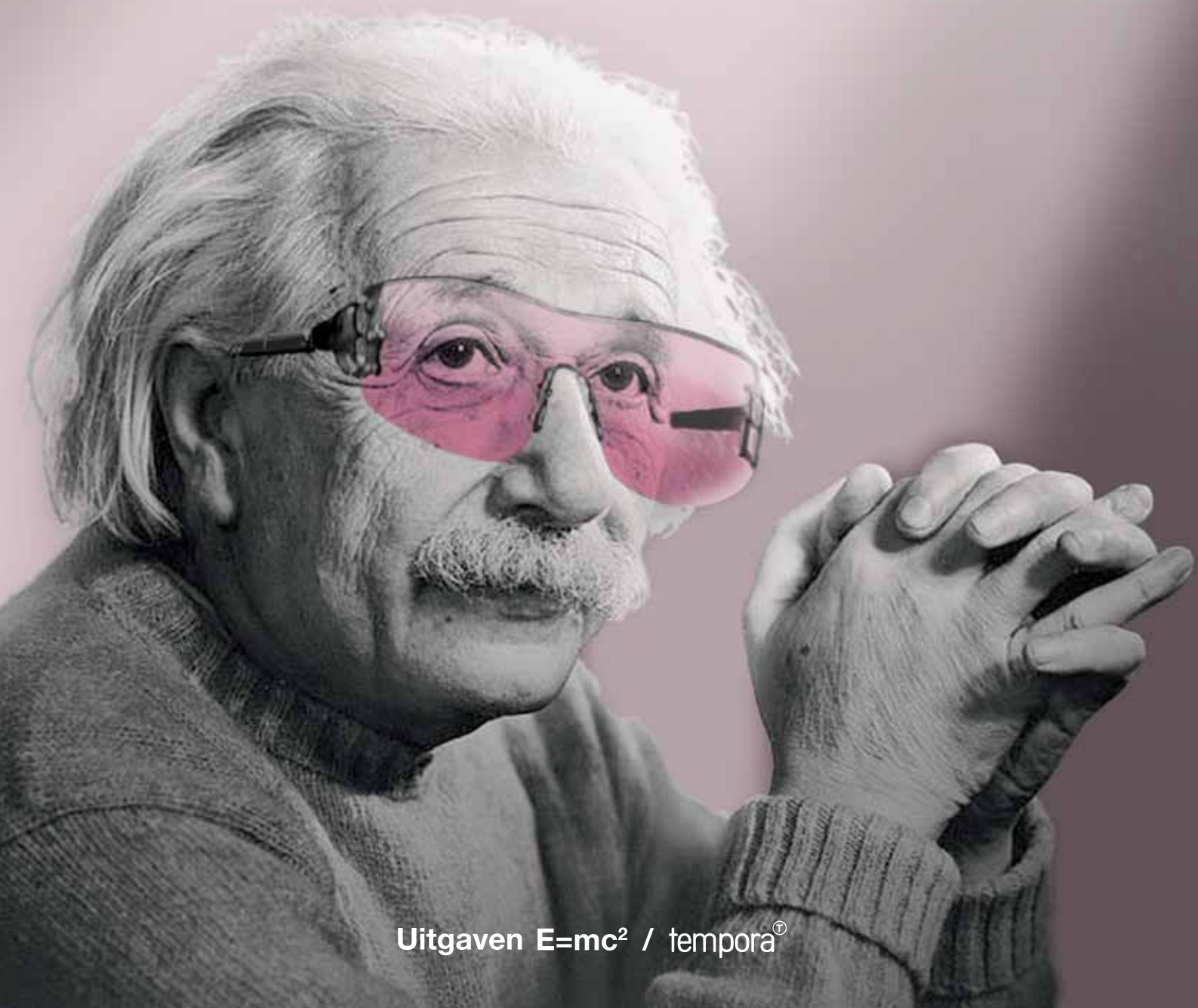


EXPO EINSTEIN ANDERS BEKEKEN



Uitgaven $E=mc^2$ / tempora[®]

Expo Einstein, anders bekeken

Inhoudstafel

De auteurs	5
<i>Einstein, anders bekeken</i>	5
Inleiding	9
Albert Einstein en België	11
De 19de eeuwse maatschappij en fysica ten tijde van Einstein	19
Atomen bestaan, ik heb ze gezien!	25
De geboorte van de kwantummechanica	33
De vakantie van de kat van Schrödinger	43
De speciale relativiteitstheorie	47
$E = mc^2$ onder de loep	53
Algemene relativiteit	57
De Big Bang, in enkele woorden	63
Een andere Einstein	69
De persoon Einstein	73
Lexicon	77
De tentoonstelling	83
Sponsors	93

De auteurs van de tentoonstelling

Museologisch ontwerp,
realisatie en beheer

Tempora NV

tempora[®]

Wetenschappelijk directie

E=mc² VZW



Vrije
Universiteit
Brussel

Deze pedagogische dossiers zijn gerealiseerd in het kader van de tentoonstelling Einstein, anders bekeken, een evenement georganiseerd door wetenschappers van de **Université Libre de Bruxelles** (ULB) en van de **Vrije Universiteit Brussel** (VUB) in samenwerking met **Tempora NV**.

De tentoonstelling was nooit tot stand gekomen zonder de steun van Jean-Louis Vanherweghem, Voorzitter van de Raad van Bestuur van de ULB, van Eddy Van Gelder, Voorzitter van de Raad van Bestuur van de VUB, van Pierre de Maret, Rector van de ULB en van Benjamin Van Camp, Rector van de VUB, die wij hiervoor hartelijk bedanken.

In de ULB en VUB werd het gehele evenement opgebouwd door verschillende ploegen, gecoördineerd door Henri Eisendrath, professor Emeritus aan de VUB en Michel Tytgat, gekwalificeerd onderzoeker FNRS en lesgever aan de ULB.

De wetenschappelijke inhoud, het draaiboek van de expositie, en het opstellen van de teksten werden gezamenlijk besproken en vastgelegd door:

Albert Art (ULB), Alex Borgoo (VUB), Léon Brenig (ULB), Didier Devriese (ULB), Jan Heyninck (VUB), Denis Johnson (VUB), Dirk Lefebvre (VUB), Philippe Léonard (ULB), Christiane Schomblond (ULB), Walter Van Rensbergen (VUB), Caroline Verhoeven (VUB) en Jean Wallenborn (ULB)

De pedagogische dossiers werden gerealiseerd onder leiding van Jean-Pierre De Greve (VUB) et Michel Tytgat (ULB), in samenwerking met:

Glenn Barnich (ULB), Erwin De Donder (VUB), Didier Deses (VUB), Henri Eisendrath (VUB), Kamil Fadel (Palais de la Découverte, Paris), Henk Forriers (VUB), Jan Heyninck (VUB), Franklin Lambert (VUB), Philippe Léonard (ULB), Philippe Mergny (Communauté Française), Christiane Schomblond (ULB), Eric Stijns (VUB), Frank Tavernier (VUB), Michel Tytgat (ULB), Jean Wallenborn (ULB) en met de bereidwillige samenwerking van M. Jacques Houard (ULB), Ad Meskens (VUB) en Dimitri Terryn (VUB).

Voor de informatica en audiovisuele aspecten werd deze pedagogische ploeg ondersteund door de dienst WEC van de VUB.

De voorstelling van de interactieve experimenten werd gecoördineerd door Jean Wallenborn (ULB) in samenwerking met:

Albert Art (ULB), Daniel Bertrand (ULB), Norbert Kruse (ULB), Philippe Léonard (ULB), Gilbert Longin (VUB), Heidi Ottevaere (VUB), Luit Slooten (VUB), Christiaan Sterken (VUB), Hugo Thienpont (VUB), Herman Van Herzeele (VUB) en Thierry Visart (ULB).

Binnen de instituten werd de administratie voor een groot deel verzekerd door Els van Gampelaere (VUB) bijgestaan door de secretaresses van de departementen natuurkunde en scheikunde van de VUB.

Voor de fiscale en juridische aspecten werd er beroep gedaan op:

Alain Renard (ULB), Nadine Verheyen (VUB), Kristel Mommaerts (VUB) et Kamel Daoud (ULB)

Verscheidende onderzoekers hebben op diverse wijzen hun bijdrage geleverd:

Alexandre Ackermans (ULB), Nicolas Cerf (ULB), Barbara Clerbaux (ULB), Salua Daghay (VUB), Stéphane Detournay (ULB), Jorgen D'Hondt (VUB), Thomas Durt (VUB), Daan Hubert (VUB), Laura Lopez Honorez (ULB), Bernard Knaepen (ULB), Wendy Meulebroeck (VUB), Michael Peeters (VUB), Guy Van der Sande (VUB), Petra Van Meulders (VUB), Alexander Wijns (VUB)

De communicatie met de secundaire scholen werd toevertrouwd aan de dienst IEOC (VUB) en de Cellule RES (ULB) en dit met de medewerking van de diensten "Ceremonieën".

Voor de Nederlandstalige versie van de pedagogische dossiers danken we het Wetenschappelijk steunfonds van de VUB voor hun financiële steun.

Einstein, anders bekeken

Omdat Einstein het anders heeft bekeken en wij hem anders gaan bekijken!

In januari 2000 kopte *Time Magazine* "Albert Einstein, the person of the century". Zijn leven was een groot avontuur dat in 1905 begon.

Als doodgewone ambtenaar op het Patentenbureau in Bern schreef hij vier artikels die onze opvatting over ruimte, tijd, materie en energie fundamenteel gingen veranderen. Deze artikels ontketenden ook een revolutie in onze visie op de wereld én in onze maatschappij.

Einstein had ook een bijzondere relatie met België. Hij heeft inderdaad enkele maanden aan de Belgische kust gewoond, hij kwam naar verschillende internationale congressen (Solvay), had familie in Antwerpen en was een goede vriend van Koningin Elisabeth, James Ensor en vele andere Belgische persoonlijkheden.

Maar Albert Einstein was niet alleen een geniale fysicus. Hij heeft zich ook maatschappelijk en politiek geëngageerd voor wereldvrede en voor de rechten van de mens. Redenen genoeg voor een tentoonstelling waar we op een andere manier scherpstellen op het werk en het leven van Albert Einstein.

Deze tentoonstelling wordt georganiseerd door de vakgroepen Fysica van de Vrije Universiteit Brussel en de Université Libre de Bruxelles, in samenwerking en met de steun van andere Belgische universiteiten.

Ze werd ook gerealiseerd met de medewerking van de vennootschap Tempora, actief in de museologie.

Het is een ludieke en interactieve tentoonstelling in de site Turn & Taxis te Brussel van 15 december 2005 tot 30 april 2006.

Via een bombardement van muonen zal men de relativiteitstheorie leren kennen. Einstein was een visionair van het onzichtbare, van het erg snelle (de snelheid van het licht) maar ook van het oneindig kleine: de atomen en de kwanta. Hij toonde aan dat atomen bestaan en gaf ons een manier om ze te tellen. Als Bohr de vader van de kwantumfysica is, dan is Einstein zonder twijfel de grootvader. Er is uiteraard ook de bekende formule $E=mc^2$. Op een interactieve manier zal men de inzichten van Einstein kunnen ontdekken, uittesten en aanvoelen.

Verder worden de talloze toepassingen die gebruik maken van de theorieën van Einstein getoond: de laser, de GPS en andere technologieën waar in onze maatschappij dagelijks gebruik wordt van gemaakt.

In “Einstein. Anders bekeken.” wordt Albert Einstein ook gesitueerd in de wereld waarin hij opgroeide en leefde zodanig dat men duidelijk kan aanvoelen hoe Einstein in 1905 – 100 jaar geleden – een ware schokgolf heeft veroorzaakt.

Deze tentoonstelling werd ontworpen voor een breed publiek. Door veel voelen, kijken en luisteren kunnen de bezoekers de boeiende wereld van de moderne fysica ontdekken.

Het gaat uiteraard niet alleen over fysica en de impact van de fysica op ons dagelijks leven. De tentoonstelling toont ook welke bijzondere man Albert Einstein was, de verschillende facetten van zijn persoonlijkheid: de wetenschapper en de uitvinder, de politieke en maatschappelijke engagementen van Einstein, de kunstenaar en zijn relatie met België.

Henri Eisendrath
Professor Emeritus Vrije Universiteit Brussel

November 2005

Inleiding

Waarom een Expo Einstein?

In 1905, in een tijdspanne van enkele maanden, schreef de jonge Albert Einstein vier wetenschappelijke artikels die onze opvattingen over tijd, ruimte en materie definitief zouden veranderen. Einstein was toen een jonge bediende aan het Patentbureau in Bern.

Een van die artikels betrof de relatie tussen massa en energie... $E=mc^2$. Vandaag kent iedereen die formule, maar niet iedereen weet welke impact deze op het eerste gezicht onschuldige formule op onze technologie, cultuur en samenleving heeft gehad.

De relativiteit heeft ons, op haar beurt, verplicht om onze visie op het heelal bij te sturen. En de kwantummechanica, waarvan Albert Einstein één van de vaders is, laat ons toe de wereld van de atomen te begrijpen; de elektronica waarvan we vandaag dagelijks gebruik maken is hier schatplichtig aan.

Unesco heeft 2005 uitgeroepen tot het internationaal jaar van de fysica. De honderdjarige verjaardag van het *wonderjaar* van Einstein werd overal ter wereld gevierd. Achter de belangstelling van het publiek voor de persoonlijkheid van Albert Einstein (verkozen tot persoonlijkheid van de

eeuw door de lezers van *TIME Magazine* en van *Der Spiegel*) schuilt een unieke opportuniteit om het publiek te sensibiliseren voor het economische en culturele belang van wetenschap voor onze samenleving. Het is ook een gelegenheid om jongeren warm te maken voor wetenschappen en alzo meerderen aan te moedigen voor een wetenschappelijke loopbaan. In 2010 zou Europa een half miljoen meer wetenschappers moeten hebben.

Waarom een tentoonstelling over Einstein in België?

Albert Einstein had een bijzondere relatie met ons land. Zo bijzonder dat we zouden kunnen stellen dat België voor Einstein, net als Duitsland, Zwitserland en de Verenigde Staten, een vaderland was:

- Hij had naaste familie in Antwerpen (zijn oom César Koch);
- Hij heeft deelgenomen aan vier Solvay Raden Fysica in Brussel;
- Hij was vriend aan huis bij Koning Albert I en koningin Elisabeth;
- Hij heeft in 1933 enkele maanden in De Haan verbleven, hij wilde niet naar Duitsland terugkeren omdat Hitler aan de macht was gekomen.

Anders bekeken?

Einstein, anders bekeken: de titel van de tentoonstelling is de sleutel om het parcours te ontdekken, de rode draad. Gedurende heel zijn leven, als wetenschapper en als geëngageerde mens, heeft Einstein zijn wereld anders bekeken. Met zijn "roze bril",

zoals hij die in de tentoonstelling opzet, heeft Einstein een vernieuwende blik geworpen op problemen waarmee de fysica op het einde van de 19de eeuw geconfronteerd werd. Dit was een revolutie waarvan we alle gevolgen nog niet kennen. Deze andere kijk willen we met deze expo benadrukken: "Uitvinden is buiten de lijnen denken". Bovendien heeft deze anticonformistische geest niet alleen op een andere manier naar de fysica gekeken. Zijn originele kijk was vaak de motor van zijn leven, bijvoorbeeld tijdens zijn studies (hij hekelde de Pruisische discipline) of zijn engagementen (als overtuigd pacifist pleitte hij voor een gewapend verzet tegen Hitler).

Ook de auteurs van deze tentoonstelling hebben Albert Einstein, zijn werk en zijn leven anders bekeken.

- Het is geen wetenschappelijke tentoonstelling, het is geen geschiedkundige tentoonstelling: het is een mengeling van beide waarbij beide invalshoeken gecontextualiseerd worden.
- Het is ook een andere kijk op de persoon Albert Einstein: een wetenschapper, ja, maar ook een geëngageerde persoon die het opnam voor mensenrechten, voor vrede, voor democratie.

Deze *andere kijk*, deze roze bril, kan door de bezoeker op verschillende momenten tijdens het bezoek van de tentoonstelling ervaren worden. Maar ook in de promotiecampagne is anders bekijken legio. In de flyer van de tentoonstelling, bijvoorbeeld, nodigen we de mensen uit om buiten de lijnen te denken.

De uitgangspunten van de tentoonstelling

Wetenschappelijk en historisch

Het is zonder twijfel de eerste sleutel die we nodig hadden om het parcours van de tentoonstelling te ontwerpen. Het mocht geen louter wetenschappelijke tentoonstelling worden waar de bezoeker in een soort laboratorium wetenschappelijke proeven uitvoert. De historische dimensie is alles behalve bijkomstig in het tentoonstellingsparcours.

Maar de aandacht voor de historische dimensie is niet alleen het leven van Albert Einstein vertellen. Uiteraard zijn er biografische elementen in het parcours. Maar ze zijn niet gewoon weg chronologisch geordend. Er zijn andere belangrijke historische situeringen. Ook in de wetenschap is geschiedenis belangrijk: Einstein was een kind van zijn tijd en bouwt verder op de fysica van de 19de eeuw. En wat het leven van de geleerde betreft ligt het zwaartepunt op zijn politieke en sociale engagementen.

Vier artikels

We waren er ook al heel vroeg van overtuigd dat de eerste vier artikels, die in 1905 werden gepubliceerd in het tijdschrift *Annalen der Physik*, het vertrekpunt moesten vormen. Deze artikels moesten in het centrum van het wetenschappelijk deel van de tentoonstelling staan, want zij zorgden voor de schokgolf waarvan de gevolgen ook vandaag nog voelbaar zijn. Daarom kan de bezoeker zich vanuit het hart van de tentoonstelling begeven naar vier afzonderlijke ruimten, die telkens worden ingeleid door het overeenstemmende artikel uit 1905: de kwanta, de atomen, $E=mc^2$, de relativiteitstheorie. We

hebben ons willen houden aan deze indeling, waardoor we dus ook een ruimte aan de kwantummechanica hebben gewijd, terwijl andere tentoonstellingen over Einstein's werk geen aandacht besteden aan dit aspect. Wij hebben dit probleem niet willen ontwijken want één van de artikels uit 1905 vormt de basis van deze theorie, vandaag zowat de belangrijkste pijler van fysica.

Een tentoonstelling ... een bijzonder medium

Trouwe bezoekers van tentoonstellingen weten dat in dit medium slechts een beperkte hoeveelheid informatie kan verwerkt worden, anders slaat de bezoeker op de vlucht van vermoeidheid. Men moet dus vooral inspelen op de emoties, de indrukken. Daar ligt wat ons betreft de echte kracht van het medium. In een tentoonstelling over Einstein's werk komt hier nog een moeilijkheid bij: we hebben te maken met werelden die ons totaal vreemd zijn... en die bijzonder moeilijk uit te beelden zijn. Denk maar aan de schaal van de atomen en van de snelheid van het licht.

We hebben Einstein's theorieën dus niet willen uitleggen. Dit is trouwens heel moeilijk zonder ingewikkelde wiskundige formules. Het publiek moet de theorieën aanvoelen. En via andere middelen zetten we de bezoeker ertoe aan een stapje verder te gaan. De bedoeling is de bezoeker nieuwsgierig te maken, hem ervan bewust te maken dat onze kijk op het heelal, tijd en ruimte niet zo onveranderlijk is als we vaak denken.

Het is de bezoeker die ons zal vertellen of we erin zijn.

Albert Einstein en België

Franklin Lambert

Ondervoorzitter van de Solvay Instituten

Professor Vrije Universiteit Brussel

Samenvatting van het boek "Albert Einstein en België".



schappelijke loopbaan. Maar het was niet zijn eerste contact met België.

Inderdaad, Albert Einstein had een oom, Caesar Koch, broer van zijn moeder, die het Zwitserse burgerschap verwierf en zich nadien - omstreeks 1890- in Antwerpen vestigde. Deze welvarende oom bood de jonge Albert, die zonder eindexamen het Luitpoldgymnasium van München verlaten had en zich van de Duitse nationaliteit wilde losmaken, raad en financiële hulp. Het briljante idee om aan het beroemde Federale Instituut voor Technologie (ETH) van Zürich te gaan studeren, en om zodoende een Zwitsers paspoort te bemachtigen aan het eind van deze studies, had, zoals iedereen weet, verregaande gevolgen.

Uit dankbaarheid voor deze “geliefde oom Caesar” stuurde Einstein hem in 1895 zijn allereerste wetenschappelijke manuscript, getiteld “Über die Untersuchung des Aetherzustands im Magnetischen Felde”. Een merkwaardige korte verhandeling –Albert was toen zestien jaar- die er op wijst dat zijn belangstelling voor elektrodynamica zeer vroeg ontstond, lang vóór zijn “Zur Elektrodynamik Bewegter Körper”. Dit mythische artikel over de relativiteit, dat op 30 juni 1905 bij de *Annalen der Physik* toekwam, had, volgens hem, nog maar de vorm van een schets ...

Einstein's eerste manuscript bleef honderd jaar in België vóórdat het uiteindelijk in Londen verkocht werd.

Einstein kwam ook heel vaak op bezoek bij zijn “Belgische familie”, ook wanneer hij zich later herhaaldelijk naar Holland begaf, of op doorreis was naar Frankrijk en Amerika. Dit bracht hem niet alleen naar Antwerpen of Brussel, maar ook naar Luik toen oom Caesar daar bij zijn

gescheiden dochter Suzanne ging wonen. De al nauwe familiale band werd nog verstevigd na Albert's huwelijk met Elsa in 1919, aangezien Caesar Koch ook de broer was van de moeder van Elsa.

Vandaag herinneren de kleindochters van Caesar zich nog steeds de leuke bezoeken van “cousin Albert” en vooral de opwindende bij het ontvangen van zijn eerste privé-uitnodiging op het Koninklijk Kasteel van Laken in mei 1929. Ook de mooie dozen met lekkere hapjes die hij hen toestuurde uit Amerika tijdens de Tweede Wereldoorlog zijn ze niet vergeten. “Cousin Albert” was immers een smulpaap. Bij elke bezoek kwamen er bijzondere gerechten op tafel...

De vermelding van zijn eerste uitnodiging aan het Hof brengt mij ertoe verder in te gaan op zijn nauwe banden met het koninklijke echtpaar.

De diepte en eenvoud van zijn vriendschap met Koningin Elisabeth komt sterk tot uiting in de lange briefwisseling tussen deze twee uitzonderlijke figuren. Een twintigtal brieven van Einstein aan de koningin bevinden zich op het Paleis van Brussel, in het koninklijke archief. De eerste is van maart 1929 en houdt verband met de viering van zijn vijftigste verjaardag. De laatste brief schreef hij enkele weken vóór zijn dood. Filosofie en muziek komen in deze brieven dikwijls aan bod, vooral in deze die hij vanuit Princeton verstuurde. Ook is er soms sprake van fysica en vallen er lovende woorden over de eenzaamheid die het creatief denken bevordert ...

Einstein voerde ook heel wat gesprekken met Koning Albert over politieke en sociale problemen, de grote internationale uitdagingen waarmee de Volkenbond te kampen had, de

Vijftig jaar geleden, op 18 april 1955, overleed Albert Einstein, de geniale fysicus, de ziener waarvan de blik tot het hart der dingen wist door te dringen, de overtuigde pacifist, en, volgens *Time Magazine*, de “Man of the Century”.

Nog dezelfde dag ontving zijn stiefdochter Margot een telegram, getekend Elisabeth van België.

Was dit een formaliteit, zoals de vele andere berichten die in Princeton toestroomden?

Zeker niet. Zijn bijzondere vriendschap met de koningin is welbekend. Ook tal van roemrijke Belgische gebeurtenissen, zoals de Solvay Raden Fysica, die in Brussel plaatsvonden en waaraan hij vier keer deelnam, worden herhaaldelijk vermeld.

Maar hiernaast waren er ook heel wat andere, minder bekende banden tussen Einstein en ons land. Over deze wil ik het hier even hebben.

Als je de vele teksten over Einstein raadpleegt krijg je de indruk dat zijn eerste kennismaking met België in 1911 plaatsvond ter gelegenheid van de allereerste Solvay Raad. Deze bijeenkomst was zeker belangrijk en had zelfs een grote invloed op zijn werk en op de ontwikkeling van zijn weten-

moeilijkheid om de vrede te handhaven, het ethische probleem van de dienstweigering ...

Zijn allereerste contacten met de koning vonden plaats ter gelegenheid van de eerste twee Solvay Raden Fysica van 1911 en 1913, die volgens de traditie aanleiding gaven tot een uitnodiging op het Koninklijk Paleis. Einstein speelde vanaf het begin een prominente rol op deze prestigieuze bijeenkomsten. Hij was de enige Duitse fysicus die uitgenodigd werd op de eerste twee Raden die na de eerste Wereldoorlog bijeen-geroepen werden. Hij accepteerde de uitnodiging van 1921, maar bleef uit Brussel weg omdat hij toen Chaim Weizmann vergezelde op tournee in de Verenigde Staten om fondsen

te werven voor de stichting van de Hebreeuwse Universiteit van Jeruzalem. In 1924 weigerde hij naar Brussel te komen omdat hij niet kon aanvaarden dat andere Duitse collega's niet uitgenodigd waren. Hoe kon men wetenschappers gezamenlijk verantwoordelijk houden voor de daden van de regering van het land waartoe zij behoren?

Nadat Duitsland in 1926 lid was geworden van de Volkenbond, werd het voor de Wetenschappelijke Commissie van het Solvay Instituut voor Fysica eindelijk weer mogelijk om Duitse geleerden uit te nodigen. Dit gebeurde nadat de beroemde Nederlandse fysicus Hendrik Antoon Lorentz, voorzitter van deze commis-

sie, over deze zaak persoonlijk onderhandeld had met Koning Albert.

Einstein werd toen ook meteen verkozen om deel uit te maken van de Wetenschappelijke Commissie Fysica, en woonde de twee belangrijke Raden van 1927 en 1930 bij. In juli 1932 kwam hij ook naar Brussel om de Raad van 1933 voor te bereiden.

De Solvay Raden waaraan Einstein deelnam staan bekend als de meest opwindende. Zij waren het internationale podium waarop de opeenvolgende stappen in de "kwantumrevolutie" verkondigd werden.

Het is niet mijn bedoeling een volledig overzicht te geven van de wijze waarop deze bijeenkomsten het weten-



schappelijke oeuvre van Einstein beïnvloedden. Toch wil ik opmerken dat hij zich bij zijn terugkeer naar Praag, na de Raad van 1911, niet alleen toelegde op de ontwikkeling van zijn gravitatie-theorie (beter bekend onder de benaming “algemene relativiteits-theorie”), maar dat hij ook ijverig naar een oplossing zocht van het raadsel dat ontstaan was uit zijn gewaagde hypothese van het “lichtkwantum”.

De legendarische confrontatie tussen Einstein en Bohr, die op dramatische wijze tot uiting kwam tijdens de discussies op de Solvay bijeenkomsten van 1927 en 1930, hadden een blijvende invloed op de houding van de fysici tegenover de zogenaamde “Kopenhaagse interpretatie van de kwantumtheorie”.

De argumenten die langs de twee kanten aangebracht werden spelen nog tot heden toe een belangrijke rol voor dezen die zich buigen over de betekenis van de grondslagen van de kwantumtheorie.

In dat verband kan ook vermeld worden dat Einstein, tijdens de laatste maanden die hij in 1933 aan de Belgische kust doorbracht, een experiment uitdacht dat twee jaar later beroemd zou worden als de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) paradox.

Anderzijds hebben de eerste Solvay Raden op onbetwistbare wijze bijgedragen tot de erkenning van Einstein's genie. Het waren precies de twee glories van de Duitse fysica, Max Planck en Walther Nernst, die zo nauw betrokken waren bij het initiatief van Ernest Solvay, die Einstein in 1913 in

Zürich bezochten om hem een leidende positie aan te bieden op het Kaiser Wilhelm Instituut van Berlijn.

Enkele Belgische fysici hadden een belangrijk contact met Einstein. In chronologische volgorde zijn het :

- Emiel Verschaffelt die werkzaam was in Nederland, hoogleraar werd in Brussel en Gent, en tijdens de eerste jaren optrad als secretaris van de Wetenschappelijke Commissie van het Solvay instituut voor Fysica.
- Theophiel De Donder, de “vader” van de theoretische natuurkunde aan de Université Libre de Bruxelles, die via een uitgebreide briefwisseling tussen 1916 en 1923 bijdroeg tot de ontwikkeling van Einstein's gravitatie-theorie.
- Georges Lemaître, beroemd voor zijn werk op het vlak van de kosmologie, Francqui-prijs in 1934, kanunnik, hoogleraar aan de Université Catholique de Louvain en lid van de Pauselijke Academie voor Wetenschappen.
- Jacques Errera, Francqui-prijs in 1938, die verbonden was aan de Université Libre de Bruxelles, en Einstein in 1933 verwelkomde in zijn laboratorium. Hij werd tussen 1959 en 1969 commissaris voor Atoomenergie.

Einstein ontmoette ook andere bekende figuren tijdens zijn verblijven van langere duur in België.

Een eerste verblijf van een maand vond plaats in augustus 1932, net na de Reichstagverkiezingen die van het NSDAP de eerste partij van Duitsland maakten. Ten gevolge van de bloedige rellen die hierdoor in heel wat steden ontstonden werd aan Ein-



Solvay Raad 1927

stein de raad gegeven om uit Berlijn weg te gaan tot de kalmte terug zou keren. Hij had zich immers aangesloten bij een groep intellectuelen die de SPD en de KPD opgeroepen hadden om een blok te vormen tegen de nationaal-socialisten. Einstein zocht onderdak in een herberg van Frahinfaz, nabij Spa. De plek was zó afgelegen dat het Emiel Vandervelde, voorzitter van de Belgische Werkliedenpartij, heel wat moeite kostte om hem in "Hôtel Jamar" te ontmoeten. Verschillende brieven getuigen van de vriendschap en wederzijdse waardering tussen de fysicus en de socialistische leider. Ook met Jules Destrée, oud-minister en stichter van de "Académie royale de langue et littérature françaises" had Einstein meermaals contact in het kader van de Internationale Commissie voor Intellectuele Samenwerking die door de Volkenbond was opgericht.

Uit de briefwisseling van Frahinfaz, tussen Einstein en zijn medewerker Walther Mayer die in Berlijn was gebleven, blijkt duidelijk dat Einstein tijdens de zomer van 1932 de beslissing genomen had om het aanbod van een deeltijdse aanstelling aan het Princeton Institute for Advanced Studies te aanvaarden. De politieke ontwikkelingen van het begin van het jaar 1933 zouden deze plannen in de war sturen. De dramatische gebeurtenissen die in Berlijn in maart plaatsvonden zouden hem niet langer toelaten zijn tijd te verdelen tussen Duitsland en Amerika.

Dit brengt ons dan naar het tweede en laatste verblijf van Einstein in België.

Aan het einde van hun derde winter in Californië keren Albert en Elsa terug naar New York waaruit ze op 18 maart vertrekken aan boord van de S.S. Belgenland, die voor de laatste keer naar Antwerpen vaart. Tijdens

de reis vernemen ze dat hun buitenverblijf in Caputh doorzocht was door de nazi's en dat hun bankrekeningen geconfisqueerd waren, evenals de inhoud van de bankkluis van Elsa.

Gelukkig komt er dan toch een verrassend bericht toe in de vorm van een telegram van Arthur De Groodt, Professor aan de Universiteit van Gent,

om zich los te maken van de Duitse nationaliteit.

De Belgische dagbladen publiceren het bericht dat de "stem van Einstein in België universeel is geworden doordat het niet meer de stem is van Duitsland".

Op 1 april gaan Albert en Elsa naar



Aankomst te Antwerpen in 1933

die hen uitnodigt om enkele dagen bij hem door te brengen op kasteel Canteroy in Mortsel. Dit biedt hen de kans om te informeren naar de dochters van Elsa, die waarschijnlijk in Berlijn zijn achtergebleven, en om wat rustig na te denken over de situatie.

Einstein accepteert de uitnodiging en wordt op 28 maart, bij zijn aankomst in Antwerpen, ontvangen door een indrukwekkende delegatie. Hij geeft tijdens een persconferentie kennis van zijn besluit niet naar Duitsland terug te keren en vijf of zes maanden door te brengen op "neutraal" grondgebied aan de Belgische kust. Nog dezelfde dag dient hij een ontslagaanvraag in bij de Pruisische Academie en onderneemt hij stappen

het badplaatsje De Haan en nemen hun intrek in "Villa Savoyarde", die gehuurd was door bemiddeling van de echtgenote van Arthur De Groodt, en weldra onder de bescherming van de Rijkswacht geplaatst wordt op verzoek van het Koninklijk Paleis.

Einstein probeert daar in de kalmte te werken met Walther Mayer die enkele dagen later toekomt. Hij bekommert zich niettemin over het lot van de talrijke Joodse navorsers en intellectuelen die uit de Duitse universiteiten weggestuurd worden, en tracht hen bij te staan door aan te kloppen bij enkele invloedrijke vrienden, waaronder de bekende en zeer actieve Max Gottschalk. Hij krijgt ook regelmatig bezoek, onder meer van zijn Belgische familieleden, van enkele fysici

zoals Philip Frank, Georges Lemaître en Paul Langevin, van de artiesten James Ensor en Felix Labisse en van andere prominente figuren. Hij wandelt veel, poseert gewillig voor de lokale schilder Alfons Blomme en geeft enkele lessen aan de Universitaire Stichting in Brussel, waar hij naast al vermelde Belgische fysici ook Leo Szilard ontmoet.

Tijdens de maand juli, na een uitstap naar Groot-Brittannië waar hij enkele “lectures” geeft, wordt hij door Koning Albert ontboden om hem advies te geven over de zaak “Dieu-Campion”. Deze twee dienstweigeraars hebben hem, als beroemde en uitgesproken pacifist, om steun gevraagd. Ter gelegenheid hiervan krijgt zijn legendarisch pacifisme een flinke deuk. Het is hem in dit klein en neutraal België duidelijk geworden dat zijn voormalige positie van “absolute dienstweigerer” onhoudbaar is en daarom bijgestuurd moet worden, net zoals een fysisch principe dat de confrontatie met de realiteit niet overleeft ...

Eind augustus verschijnen enkele angstwekkende berichten in de pers. Einstein's vriend Theodore Lessing is door nazi-militanten vermoord in Tsjecho-Slowakije en op het hoofd van Einstein zelf is door de beruchte “Vehme” een belangrijke som geplaatst.

Elsa begrijpt dat het voor Albert tijd is om zonder verwijl en zo discreet mogelijk naar Engeland te vertrekken. Enkele weken later verlaat ook zij België, via Antwerpen, aan boord van de S.S. Westernland, waarop Albert haar vervoegt in Southampton. Zij komen in New York aan op 17 oktober.

Gedurende de volgende jaren zou België nog maar een herinnering zijn, onderhouden door de vele brieven van familie en bekenden, en door de

aanwezigheid in Princeton van zeer hechte vrienden die hij in Brussel had leren kennen.

Het is ontroerend om vast te stellen dat Paul Oppenheim, die samen met Otto Nathan Einstein's as zou verstrooien op een geheime plek, de oude vriend was die de geleerde in 1911 had leren kennen ten huize van de toenmalige Rector van de Université Libre de Bruxelles, ter gelegenheid van de eerste Solvay Raad.

Anderzijds zou Einstein's impact op België met de jaren sterk toenemen ten gevolge van omstandigheden die hij zeker niet kon voorspellen op het ogenblik dat hij de Belgische kust verliet.

Deze impact staat rechtstreeks in verband met de ontdekking van de kernsplijting in 1938 en met de tragische gevolgen van de brief van 2 augustus 1939 die Einstein aan President Roosevelt richtte.

Het is de moeite om even stil te staan bij de redenen die hem ertoe aanzetten deze brief te schrijven, een tussenkomst die hij later zijn “grote fout” zou noemen.

De brief aan Roosevelt was immers niet de eerste brief die hij uit vrees voor een “nazi-atoombom” schreef. Een vroegere brief was gericht aan de Belgische ambassadeur in Washington en werd, net zoals deze voor Roosevelt, geschreven op aandringen van Leo Szilard en Eugène Wigner. Het was de bedoeling van deze fysici dringend contact op te nemen met de Belgische regering om te voorkomen dat de Union Minière du Haut-Katanga, die onder de controle stond van de Belgische Staat, het uitzonderlijke rijk uraniumerts uit Belgisch-Kongo aan de Duitsers zou verkopen. Einstein leek hen de ideale

figuur om dit contact te vergemakkelijken, dank zij zijn bekende vriendschap met de koningin-moeder. Het bleef hier echter niet bij, maar het vervolg is wat lang om hier in detail weer te geven. Het verhaal rond de brief van Einstein aan Roosevelt is te vinden in het boek: “Leo Szilard: His Version of the Facts”.

Iedereen kent de gevolgen van Einstein's “grote fout” en van het reusachtig “Manhattan District” project dat er uit voortvloeide. De Belgische connectie die tot de brieven leidde en de impact van deze connectie op het ontstaan van belangrijke onderzoeksinstrumenten, zoals het SCK in Mol en het Interuniversitair Instituut voor Kernwetenschappen, zijn een stuk minder bekend. Ook dit verhaal kan hier, zelfs in het kort, niet weergegeven worden. Laat ons enkel tot slot benadrukken dat de “grote fout” van Einstein heel positieve gevolgen had voor generaties van Belgische fysici en er voor zorgde dat een klein land, zonder noemenswaardig wetenschappelijk potentiaal op het vlak van de subatomaire fysica, betrokken zou zijn bij de allereerste stappen van het naoorlogse kernonderzoek.



1927.
Einstein en Niels Bohr te Brussel

De 19de eeuwse maatschappij en fysica ten tijde van Einstein

Kamil Fadel

Chef du Département de Physique au Palais de la Découverte (Paris, France)



Of ze zich nu afspeelt in het domein van de theorie of van de praktijk, of ze het werk is van geniale denkers zoals Newton en Einstein, of van ingenieurs die zich toespitsen op de toepassingen, de wetenschappelijke activiteit kan niet los gezien worden van de socioculturele en industriële context waarin ze plaats vindt.

Dit schijnt vanzelfsprekend te zijn voor de toepassingen. Is deze bemerking echter ook geldig wanneer het gaat over abstracte en filosofische overwegingen? Kan de conceptuele revolutie, die door Einstein (1879-1955) ingevoerd werd en die de intuïtieve opvattingen over tijd en ruimte omver gooide, beschouwd worden als een vrucht, een “onvermijdelijke” doorgang van de 19e eeuwse maatschappij? We zullen dit in dit artikel van dichterbij bekijken na een kort overzicht van Einstein's jeugd.

Isaac Newton



De jeugd van Albert Einstein

Als zoon van een joodse familie komt Albert Einstein ter wereld op 14 maart 1879 te Ulm, Duitsland. De kanselier Bismarck (1815-1898) had juist antisocialistische wetten afgekondigd om de arbeidersbeweging in de kiem te smoren. Wilhem Marr (1819-1904), een journalist voor wie de joden verantwoordelijk waren van de financiële crisis, stelt een tekst op met als titel: “Der Sieg des Judenthums über das Germanenthum. Vom nicht-confessionellen Standpunkt aus betrachtet” (De overwinning van het jodendom op de Germanen, bekeken vanuit een non-confessioneel standpunt.) Zijn pamflet krijgt zeer veel bijval. Tegelijkertijd smeed hij ook de termen “antisémitisme” en creëert de “Liga der antisemieten”. Het was toen een tijdperk van sterke industriële expansie in Europa die mensen ertoe aanzette om het platteland te verlaten en naar de stad te trekken. Deze volksverhuizing vormt de oorzaak van de sociale conflicten. De Joodse plattelandsbevolking in het zuiden van Duitsland vermindert zich aldus met 70% tussen 1870 en 1900. Einstein is 1 jaar als zijn ouders besluiten om naar München te verhuizen. Zijn vader, die in die tijd een handel in veerbedden had, veranderde van koers en richtte een klein bedrijfje op dat lampen, dynamo's en andere elektrische instrumenten vervaardigde. De plaats die de elektriciteit innam in het dagelijkse leven werd almaar belangrijker: Edison had juist zijn lamp met een gloeidraad uitgevonden, de elektrificatie van de steden was in volle gang, de transatlantische kabels lieten een langeafstandscommunicatie toe,... Helaas, tegenover reuzen als Siemens, A.E.G...gaat het bedrijfje failliet in 1894. De ouders van Einstein verlaten dan Duitsland

en vestigen zich in Italië. Einstein zelf zet nog gedurende enkele jaren zijn studies voort aan het Gymnasium (equivalent van de middelbare school). Maar in 1895, walgend van de volpropperij met encyclopedische kennis gemengd met een quasi-militaire discipline, die hij verplicht is om te volgen besluit hij de school te verlaten: hij vervoegt zijn ouders in Italië, temeer omdat hij de militaire dienstplicht wil vermijden. Omringd door een technisch en industrieel milieu, is het vanzelfsprekend dat Einstein eraan denkt om zijn hoger onderwijs in natuurkunde voort te zetten. Maar omdat hij geen eindexamen heeft, besluit hij naar het Polytechnische School van Zurich of het ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) te gaan, waar je wordt toegelaten via een wedstrijd. Hij wordt nog in hetzelfde jaar van aanvraag (1896) toegelaten. Einstein is op dat moment geen Duitser meer, maar een staatsloze! In die tijd is Zurich een stad met 153 000 inwoners. Net als in Bazel en Bern, vind men er zeer veel studenten waaronder ook vele Russische ballingen sinds 1870. De stad bruist van ideeën en vormt om die reden ook een voedingsgrond waar vele revolutionaire ideeën ontkiemen. Einstein logeert in de kamer die door Rosa Luxemburg, de beroemde Duitse marxistische revolutionair, beschikbaar is gesteld. Zürich herbergt een geanimeerd intellectueel leven: iedere avond, overspoelen de studenten de cafés en de bars, hoeden er vergaderingen, en discussiëren over politiek, religie, wetenschappen,... We vinden er Leon Trotsky, Benito Mussolini, Pierre Kropotkin, Chaïm Weizmann (toekomstige president van Israël), Lenin... De grote psychoanalyst Carl Gustave Jung (1875-1961) zou later over de sfeer in Zurich schrijven: "hier was de atmosfeer vrij, we waren niet bezwaard door de sombere mist der eeuwen". Het is in deze context dat

Einstein zijn hogere studies deed. Hij maakt hier ook kennis met Friedrich Adler (1879-1960), toekomstige moordenaar van de eerste minister van Oostenrijk (1916) en waarvan de vader de oprichter was van de Oostenrijkse sociaal-democratische partij. Adler is gepassioneerd door de verschijning en gedachten van de grote filosoof Ernst Mach (1838-1916), die hij dichter bij de ideeën van Karl Marx zal proberen brengen. De ideeën van Adler brengen Einstein tot een permanente opstand tegen de bereikte resultaten van de wetenschap. Einstein en Adler worden goede vrienden. In 1900, na schitterende studies, en een diploma van het Polytechnische School, verlaat Einstein de instelling. Gedurende 2 jaren voert hij verschillende kleine betrekkingen uit. In juni 1902, het jaar waarin zijn vader overlijdt, wordt hij aangenomen als expert op het patentbureau te Bern: zijn werk bestaat erin om nieuwe uitvindingen te onderzoeken, vaak elektrische apparaten...

Fysica aan het einde van de 19de eeuw

Gedurende zijn hogere studies, blijft Einstein bewonderend ten opzichte van de resultaten van het newtoniaans mechanisme. Door te beschouwen dat gas gevormd is door kleine deeltjes, was het bijvoorbeeld mogelijk om een verband te leggen tussen temperatuur, druk en volume, en de wetten terug te vinden die door **Boyle, Mariotte, Charles, Gay-Lussac...** werden opgesteld. Dit was zeer indrukwekkend en toonde het belang van het newtoniaans mechanisme die de fysica al 2 eeuwen domineerde. Maar een nieuwe fysica, die even belangrijk is als de vorige, begint zich in de loop van de jaren 1880 te ontwikkelen: de synthese van elektriciteit, magnetisme, en optica, gerealiseerd door de Schot James Clerk Maxwell (1831-1879). Deze laatste toonde inderdaad aan dat het mogelijk was om alle elektrische en magnetische fenomenen te beschrijven met behulp van één en dezelfde theorie, het elektromagnetisme. Maar deze theorie voorspelt het bestaan van een nieuwe soort gol-



James Clerk Maxwell

ven waarvan de trillingen twee concepten omvatten die de Brit Michael Faraday (1791-1867) had ingevoerd: het **elektrische veld** en het **magnetische veld**. Nog altijd volgens diezelfde theorie moesten deze golven zich voortbewegen met een snelheid die gelijk moest zijn aan deze van het licht (gemeten waarde). Hierdoor wordt Maxwell ertoe geleid om licht als een elektromagnetische golf te beschouwen, golven die een zeer groot golflengte-interval omspannen, van de lage frequenties tot de hoge, langs het visuele gedeelte passerend (met grootteorde 10^{15} Hz), dwz. Het gedeelte dat we "licht" noemen. Dat licht een golf moet zijn was geen nieuwigheid in de fysica. Een aantal dat gerealiseerd werd tijdens de eerste helft van de 19e eeuw had dit golfkarakter bepaald, in het bijzonder die uitgedacht door François Arago (1786-1853) die toeliet om de snelheid van licht in de lucht en in water te vergelijken. Rond 1850 hadden Fizeau (1819-1896) en Léon Foucault (1819-1868) aangetoond dat deze snelheid in water kleiner was: dit was in overeenstemming met de **golftheorie**, en onverenigbaar met de **deeltjestheorie**. De nieuwigheid die Maxwell introduceerde was verbonden aan de natuur van het golf fenomeen: tot op dat ogenblik had men geen idee wat er kon golven, trillen, in een lichtgolf. Wat trilt in het licht, zegt Maxwell, is de koppeling van elektrisch veld en magnetisch veld, twee begrippen uit de elektriciteit. Maxwell drukte zich echter ongelukkig genoeg zo onduidelijk uit dat zijn theorie niet begrepen werd en dat zijn resultaten niet erkend werden op het continent. Maar de Duitser Hermann Helmholtz (1821-1894) herneemt de verhandeling van de Schot en komt er niet toe om zichzelf te overtuigen dat Maxwell zonder enige twijfel gelijk heeft. Hij belast dan zijn beste student, Heinrich Hertz (1857-1894), om het resul-

taat te controleren volgens hetwelk een vonk een elektromagnetische golf moet voortbrengen met een relatief lage frequentie die zich dan moet voortbewegen met een snelheid die gelijk is aan deze van het licht. In de loop van de jaren 1880 bevestigt deze zoon van een Hamburgse advocaat en senator experimenteel de geldigheid van de theorie van Maxwell. Hertz slaagt er inderdaad in om een golf uit te zenden en die op meerdere meters afstand op te vangen. Van dan af maken ingenieurs, technici en knutselaars, zoals de Branly's, de Popov's en de Marconi's, zich meester van de golven en ontwikkelen de **draadloze telegrafie**. De ogenblikkelijke communicatie op afstand is een feit.

Van dan af is de fysica twee grote theorieën rijk, de mechanische van Newton en de elektromagnetische van Maxwell. Men tracht ze te verenigen. In het begin zoekt men om de elektromagnetische fenomenen door mechanische modellen voor te stellen. Maar geconfronteerd met het mislukken van die initiatieven keert de situatie om, en zoeken enkele fysici dan om de wetten van de mechanica af te leiden vanuit het elektromagnetisme.

De ruimte en de tijd

Iedereen heeft al gehoord van de Einsteinse relativiteit. Men kan de motivering van Einstein om deze theorie uit te werken indelen in twee categorieën. Theoretische motivaties en praktische motivaties.

1. De theoretische bezorgdheden van Einstein

Men realiseert zich zeer vlug dat de twee giganten van de fysica, te weten Maxwell en Newton, niet alle twee gelijk kunnen hebben. Inderdaad, volgens Newton is de eenparige **rechtlijnige beweging** perfect relatief. Anders gezegd, er is geen enkel experiment binnen in een gesloten wagon, die met constante snelheid beweegt, dat toelaat om te zeggen of die snelheid nul is of verschillend van nul. Zoals Galilei zei, de eenparige rechtlijnige beweging is zoals de toestand van rust. Maar de theorie geeft aan dat men met behulp van een optisch experiment het verschil kan uitmaken. Dus moet men ofwel de theorie van Maxwell aanpassen (lees verlaten) ofwel deze van Newton, om ze beide in overeenstemming te brengen, daar de fysica zulk een contradictie niet kan dragen. Einstein was hierover zeer bezorgd.

Een tweede probleem hield hem trouwens bezig: het **inductiefenomeen**, in 1832 ontdekt door Faraday. Deze laatste had experimenteel aangetoond dat de beweging van een magneet in de buurt van een geleider, bijvoorbeeld een elektrische spoel, er een stroom in veroorzaakt, of "induceert". De beweging is relatief, om een inductie waar te nemen volstaat het dat het ene beweegt ten opzichte van het andere, waarbij het geen belang heeft welke ten opzichte van de waarnemer onbeweeglijk is. Ondanks deze symmetrie, deze rela-

tiviteit van de beweging, houdt de theorie rekening met het verschijnen van geïnduceerde stroom op twee verschillende manieren, naargelang de magneet of de spoel onbeweeglijk zijn in het referentiestelsel van het laboratorium. Ook dit was niet bevredigend in Einstein's ogen.

De overwegingen van Einstein op dit vlak brengen hem tot het in vraag stellen van twee fundamentele opvattingen die nota bene door Mach werden besproken: deze van de tijd en van de ruimte. Inderdaad, om de tegenstrijdigheden in de fysica te elimineren was Einstein verplicht om een theorie op te stellen waarin noch de ruimte, noch de tijd absoluut zijn. De lengte en de duur worden relatief ten opzichte van de waarnemer, en hetzelfde voor het begrip gelijktijdigheid van twee van elkaar verwijderde gebeurtenissen. Daar komt ook de naam van deze theorie vandaan: de relativiteit. We merken nochtans op dat deze uitdrukking een denkfout kan invoeren door te laten geloven dat alles in deze theorie relatief is. In feite bevat ze een absolute grootheid, maar deze absolute grootheid is niet de ruimte, en ook niet de tijd apart: het is een grootheid die zowel tijd als ruimte omvat. Het betreft de **ruimtetijd**.

2. Einstein's praktische bezorgdheden

In Frankrijk wordt ook Henri Poincaré (1854-1912) bezig gehouden door de problemen waarvoor Einstein zich interesseert. Ook hij zal een relativiteitstheorie opzetten die de geldende begrippen van tijd en ruimte in vraag stelt. Het is interessant om de invloed van de technologische innovaties op de overwegingen van de twee mannen te noteren. Het begrip gelijktijdigheid van twee van elkaar verwijderde gebeurtenissen, evenals de synchronisatie van van elkaar verwijderde klokken hebben immers een centrale rol in hun gedachten gespeeld. In het begin van de 20de eeuw was er een grote praktische motivatie om klokken te synchroniseren... bijvoorbeeld in de stations, of om een universele tijd te kunnen gebruiken, of ook nog voor de precieze bepaling van de geografische lengte.

Zo is Poincaré gedurende verscheidene jaren een actief lid van het Bureau van de Geografische Lengte, omdat hij betrokken was in de bepaling van de geografische lengte van het Franse koloniale grondgebied. De vaststelling van de geografische lengte van een plaats steunt op de kennis van de tijdsduur tussen het tijdstip van twaalf uur op deze plaats en het tijdstip van twaalf uur in een referentieplaats, bijvoorbeeld Parijs. Dit impliceert dus twee synchrone klokken... Om ze te synchroniseren gebruikte men telegrafische kabelverbindingen. Maar rekening houdend met de gewenste precisie was men verplicht om de tijdsvertraging op de beweging van het elektrische signaal in de kabel mee in rekening te brengen, of die van de elektromagnetische golven...

Vanuit zijn functie in het Octrooibureau in Bern wordt Einstein er toe aangezet om projecten te onder-



Henri Poincaré

zoeken die de synchronisatie van klokken willen verbeteren. Het was immers in die tijd in Zwitserland de gewoonte om klokken van een stad te synchroniseren met behulp van elektrische signalen. Bovendien gaven de klokken op de perrons niet dezelfde tijd aan als deze van de stad waar het station bij hoorde. Een peronsklok werd immers geregeld op de tijd van de belangrijkste stad op de spoorlijn. Door het venster van zijn bureau kon Einstein aldus verschillend gesynchroniseerde klokken waarnemen in perfecte harmonie zien vooruit gaan... Het feit dat de elektrische synchronisatiesignalen dikwijls langs het net van de spoorlijn werden gezonden, evenals de problemen verbonden aan de tijdsverschuiving bij het reizen per trein (sneller en over grotere afstanden) verklaren zonder twijfel Einstein's beroemde spoorwegzinspelingen, en de verscherpte interesse voor de problemen verbonden aan tijd en ruimte.

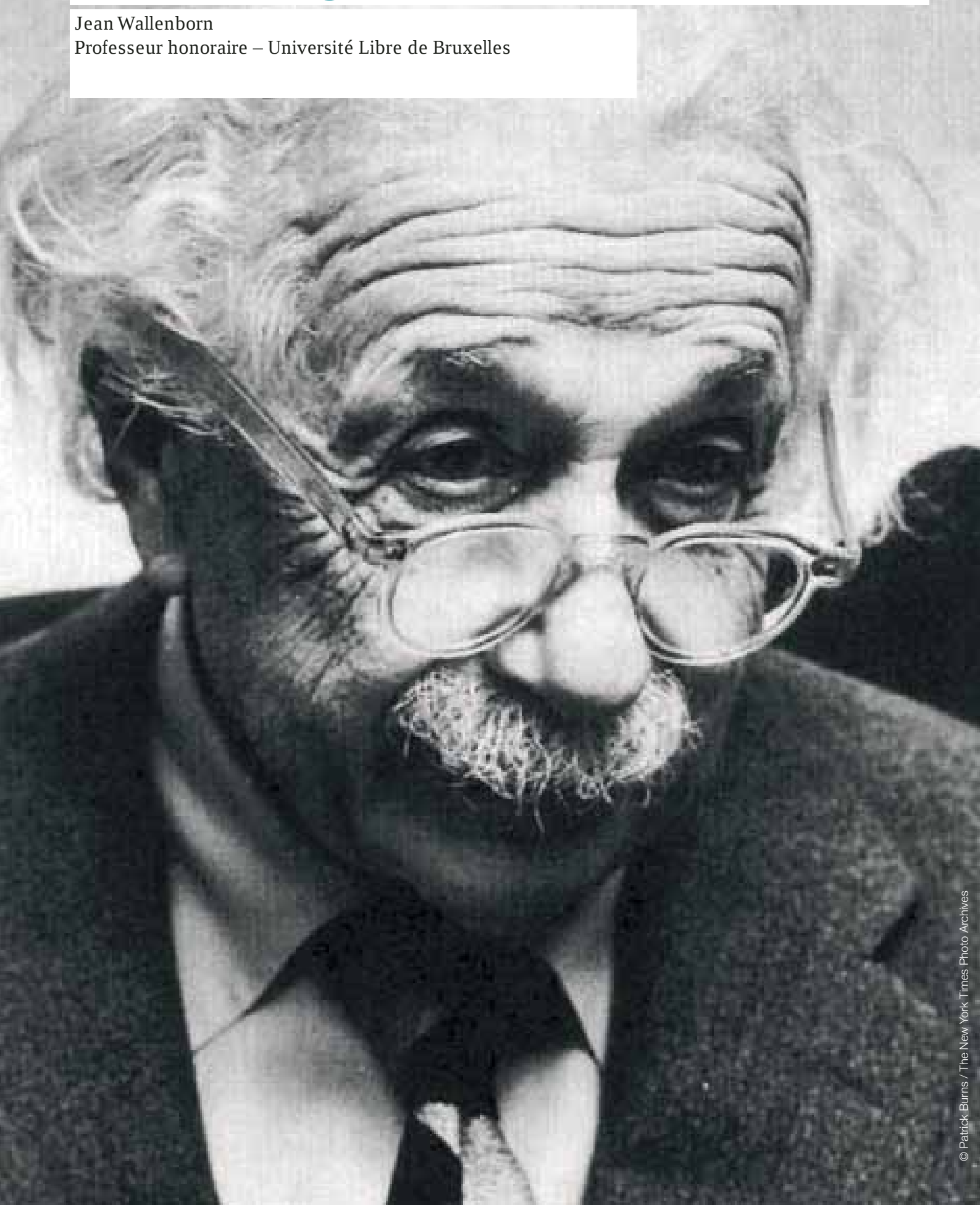
Bij wijze van conclusie

Het feit dat Einstein en Poincaré op hetzelfde moment tot dezelfde conclusies komen, namelijk de relativiteit van de tijd, de ruimte, en de gelijktijdigheid, is zeker geen toeval. Het onthult meer een speciaal element van de sfeer aan het einde van de eeuw. De fysica en de toenmalige maatschappij hadden immers beide bijgedragen tot het invoeren van een conceptuele revolutie betreffende tijd en ruimte. De fysica, omdat ze een contradictie in zich droeg: het elektromagnetisme scheen de mechanica tegen te spreken, waarbij een van de oplossingen van dit probleem de herziening van de concepten tijd en ruimte inhield; de maatschappij, omdat de treinen, de lichten en de dagelijks gebruikte klokken bezig waren om de relatie tussen mensen, tijd en ruimte te veranderen. Is het niet merkwaardig dat een analoge revolutie, waarbij de klassieke voorstelling van ruimte en beweging in vraag werden gesteld, op hetzelfde moment plaats vond in een ander domein... dat van de kunst? Heette de Einstein van de kunst niet Picasso?

Atomen bestaan, ik heb ze gezien!

Jean Wallenborn

Professeur honoraire – Université Libre de Bruxelles



Een operationele notie

In de 17de eeuw herintroduceert Descartes (1596 - 1650) atomen in de vorm van de wervelende deeltjes waaruit een gas bestaat. Hij geeft niet meer bewijzen aan dan de filosofen uit de oudheid, maar zijn ingebeelde opvatting zou een eeuw laten met name Bernoulli (1700-1782) inspireren : ervan uitgaande dat een gas uit deeltjes bestaat, bekam hij resultaten die in overstemming waren met het experiment, en ontwikkelde hij op deze manier de kinetische gastheorie, die later zou hernomen worden door Maxwell en Boltzman.

Eveneens in de 18de eeuw werd de chemie ontwikkeld. Voor Lavoisier (1743-1794), "*rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme*", wat betekent dat substanties kunnen worden ontbonden in "elementen" en dat het enkel de organisatie is van deze elementen die verandert tijdens een reactie. Tijdens dezelfde periode ontstaat er een nieuwe tak van de wetenschap, de kristallografie. De vorm van kristallen kan beschouwd worden als de weergave van de symmetrie van een elementaire baksteen, het kristal zelf als een opeenstapeling van deze bakstenen.

Na de ontdekkingen van de eeuw ervoor is het mogelijk om aan het begin van de 19de eeuw te zeggen dat de homogene materie bestaat uit gelijkaardige deeltjes, die te klein zijn om zichtbaar te zijn. Het is echter Dalton die de ware grondlegger is van de moderne atomaire theorie: hij toont aan dat het bestaan van atomen een verklaring biedt voor de eenvoudige verhoudingen waarmee gassen met elkaar reageren. Volgens hem zijn atomen sferisch, identiek voor elk element, maar verschillen ze

van element tot element, i.h.b. door hun massa.

Gedurende de 18de eeuw won het idee "atomen" aan geloofwaardigheid, vooral dankzij het werk van Avogadro, Pasteur, Bravais en Clausius. Overtuigd van het bestaan van atomen ontwikkelden Maxwell (1831 - 1879), de uitvinder van de elektromagnetische theorie, en vooral Boltzmann (1844 - 1906) de kinetische theorie die een gas beschrijft als een verzameling bewegende atomen die interageren volgens de wetten van Newton. Zij boden zo een verklaring voor praktisch alle gekende eigenschappen van gassen. Dankzij dit werk wordt Boltzmann beschouwd als de vader de statistische fysica, een tak van de fysica met talloze toepassingen (astrofysica, geofysica, nucleaire fusie, korrelige omgevingen, vervormbare materie, turbulentie, chaos, enz.).

Een filosofische visie

Het lijkt erop dat Leucippes, een Griekse filosoof waar men maar weinig van weet, de eerste was die aan atomen dacht, in de 5de eeuw voor Christus. Zijn vriend Democritus (460–370 v.C.), een goedlachse reiziger met een grote kennis, ontwikkelde de theorie verder en verduidelijkte haar. Volgens deze theorie bestaat de natuur uit leegte en atomen, materiele deeltjes die niet kunnen gedeeld worden (atoom : ethymologisch, wat niet kan gedeeld worden), die eeuwig en onveranderlijk zijn. De atomen verschillen onderling enkel in vorm en grootte. Niets anders bestaat. Het moet niet gezegd worden dat dit filosofische speculaties waren die op geen enkel bewijs gebaseerd waren. Gedurende de Oudheid zouden deze ideeën overgenomen worden door Epicurus (341–270 v.C.), en vervolgens door de Romeinse dichter Lucretius (98–55 v.C.).

Het is echter de verdeling van de wereld in vier elementen (water, aarde, lucht, vuur) die voor lange tijd het denken van onderzoekers, en dan vooral alchimisten, gaat beheersen.



Daniel Bernoulli

Tegenstand

Ondanks deze successen die mogelijk werden gemaakt door de idee van atomen geloofde een aantal wetenschappers aan het einde van de 19de niet in het bestaan van atomen omdat hun instrumenten niet in staat waren deze te detecteren. Deze voorstanders van een continue materie geloofden dat het concept energie belangrijker was en dat atomen niets anders waren dan een wetenschappelijke fictie, eenvoudige praktische hulpmiddelen die nuttig waren als geheugensteun. Lord Kelvin (1824-1907), waarschijnlijk de beste experimentele fysicus van zijn tijd, Mach (1838-1916), fysicus en filosoof die een grote invloed zou uitoefenen op de fysici van het begin van de 20ste eeuw, Berthelot (1827-1907), die fysische scheikunde toepaste op de biologie en zelfs de chemicus Ostwald (1853-1932) die de Nobelprijs zou krijgen in 1909, ontkenden allen het bestaan van atomen.



A. L. Lavoisier



L. Boltzmann



W. Ostwald

De Brownse beweging

In 1827 ontdekte de botanist Robert Brown (1773 - 1858) tijdens microscopische observaties de onregelmatige beweging van pollen in water. Hij toonde zelf aan dat deze beweging van deeltjes in water geen levende beweging was. Inerte deeltjes, zoals minerale poeders, ondergaan deze beweging ook. Om er definitief zeker van te zijn dat geen enkele vorm van leven hier invloed op had, observeerde Brown deze deeltjes in fossiel water dat ingesloten was in een kristal van geologische oorsprong.

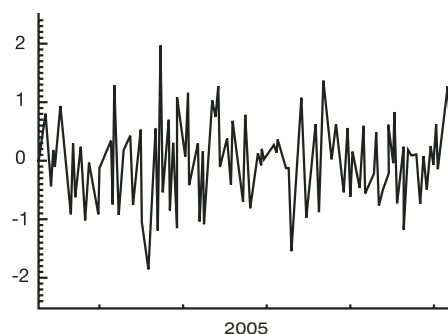
In de loop van de 19de eeuw probeerde verschillende tot het atomisme bekeerde fysici de beweging van ondergedompelde deeltjes te verklaren door botsingen die zij ondergingen met de veel kleinere atomen, die constant in beweging waren door thermische agitatie. Zij vergisten zich echter in de keuze van de belangrijke parameters om dit fenomeen te beschrijven, en zij slaagden er niet in de experimentele resultaten terug te vinden.

In 1905 had Einstein het werk van Boltzmann gelezen en had hij zelf al enkele artikels gepubliceerd over de **statistische fysica**. Hij verklaarde de Brownse beweging op originele wijze door zowel macroscopische fysische concepten, dat wil zeggen waarneembaar door onze zintuigen, zoals osmotische druk, en hun analogen in de **kinetische theorie** te gebruiken. Op deze manier kon hij meetbare grootheden en grootheden eigen aan atomen zoals hun grootte, hun aantal in een gegeven hoeveelheid materie (het getal van Avogadro) met elkaar in verband brengen.

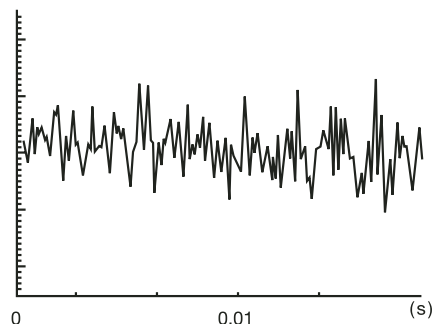
Tevens realiseerde hij zich dat de ogenblikkelijke snelheid van de deeltjes geen interessante grootte was, daar hun gemiddelde waarde nul is als de vloeistof in rust is. In de plaats daarvan beschouwde hij de kwadratische verplaatsing van de deeltjes. In tegenstelling tot de inertiële beweging waar de verplaatsing evenredig is met de tijd (dus de snelheid is een constante), is de kwadratische verplaatsing evenredig met de vierkantswortel van de tijd. Dit is karakteristiek voor een diffusiefenomeen, zoals bijvoorbeeld het verspreiden van een inktvlek in water.

Smoluchowski (1872-1917) in 1906 en Langevin (1872-1946) in 1908 vonden met andere methoden hetzelfde resultaat als Einstein. De analyses door deze drie wetenschappers zette de deur open naar de wiskundige theorie van stochastische processen, die wordt toegepast op systemen waar tenminste één van de variabelen willekeurig veranderd. Zo worden vandaag bijvoorbeeld methoden die afkomstig zijn van de Brownse beweging toegepast door financiële experts om hun klanten de best mogelijk investeringen te kunnen aanraden.

Twee stochastische fenomenen



Dagelijkse procentuele schommelingen van de Dow Jones tussen 22 februari en 12 september 2005



Elektronische ruis in een circuit gedurende 0,02 sec

Het getal van Avogadro

In 1811 oppert Amedeo Avogadro (1776 - 1856), een Italiaanse chemicus zijn hypothese, die gekend staat onder de naam wet van Avogadro: twee gelijke volumes verschillende gassen bevatten onder dezelfde omstandigheden dezelfde hoeveelheid moleculen. Het is sinds toen mogelijk om door verschillende gassen te wegen verbanden te vinden tussen het gewicht van de moleculen waaruit ze bestaan. Dit was zonder twijfel een belangrijk argument voor het bestaan van atomen. Desondanks worden de bevindingen van Avogadro pas vijftig jaar later door iedereen erkend: Loschmidt (1821 - 1895) zou pas in 1865 de eerste bepaling maken van het aantal moleculen in een cm^3 van gas.

Tegenwoordig wordt het getal van Avogadro gedefiniëerd als het aantal atomen in 12 gram C_{12} en bedraagt $6,0221 \times 10^{23}$.

Gemiddelde kwadratische verplaatsing en diffusie

Om de Brownse beweging waar te nemen, moeten de deeltjes in een onbeweeglijk volume water ondergedompeld zijn. Omdat een Browns deeltje met een even grote waarschijnlijkheid naar links of naar rechts zal bewegen zal het na lange tijd zich gemiddeld niet verplaatst hebben, en als gevolg is zijn gemiddelde snelheid nul. Door deze grootheden te beschouwen zullen we niet veel meer te weten komen over de Brownse beweging.

Het tijdsgemiddelde van een grootheid is de som van al zijn waarden op opeenvolgende tijdstippen, gedeeld door de totale tijdsduur van de meting. De gemiddelde waarde van de vierkantswortel van de verplaatsing is nooit nul, omdat de vierkantswortel van een reële grootheid altijd positief, of nul, is. Het is deze grootheid die Einstein bestudeert. Hij toont aan dat zij recht evenredig met de tijd toeneemt. De vierkantswortel van deze grootheid, die niks anders is dan de gemiddelde kwadratische verplaatsing, is dus recht evenredig met de vierkantswortel van de tijd.

Dit is een eigenschap van het fenomeen diffusie, waarvan het typische voorbeeld de verspreiding van een inktvlek in water is: de omvang van de vlek wordt groter met de vierkantswortel van de tijd. Een andere soort diffusie van groot praktisch belang is die van warmte bij het fenomeen warmtegeleiding.

In 1908 bekomt Perrin (1870-1942) de waarde van het getal van Avogadro op 13 verschillende experimentele manieren, waarvan vijf gebruik maken van de Brownse beweging. Hij bevestigt aldus de voorspellingen van Einstein. Na dit werk is iedereen overtuigd van de realiteit van atomen, zelfs de meest verstokte energisten zoals Ostwald.

Een samengesteld atoom

Op het moment dat het bestaan van atomen door iedereen wordt erkend, is het beeld dat men ervan heeft veranderd. Men schrijft hen een interne structuur toe. Het atoom is ontbindbaar. Al in 1902 stelde J. J. Thomson (1856-1940) een atoommodel voor waarin negatief geladen atomen ingebed zaten in een positief geladen pasta, zoals rozijnen in een gebak. Dit model werd weerlegd door een experiment van Rutherford (1871-1937) in 1911. Hij stelt een planetair atoommodel voor, waarin de elektronen in een baan rond een positief geladen kern cirkelen, maar dit model is niet in overeenstemming met de theorie van het elektromagnetisme van Maxwell. Het is Niels Bohr (1885-1962) die in 1913 een bijna volledig model voor het waterstofatoom ontwikkelt, maar hierin beschrijven de elektronen banen, terwijl we nu weten dat dit in tegenspraak is met de kwantummechanica. Sinds Schrödinger (1887-1961) baseert de beschrijving van het atoom zich op het begrip orbitaal, dat verband houdt met de waarschijnlijkheid om een elektron om een bepaalde plaats rond de kern aan te treffen.

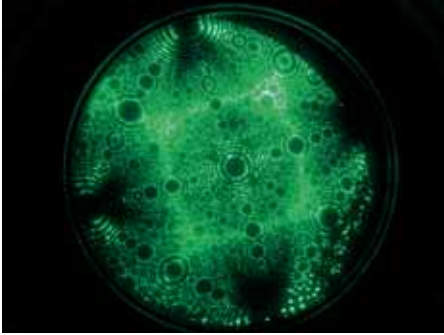
Sinds die tijd is men erin geslaagd om de kern zelf te splijten in meer elementaire deeltjes: protonen en neutronen in de eerste plaats, en meer recent quarks en gluonen.



A. Avogadro

Kijken naar en spelen met atomen.

Vijftig jaar na het grondleggende werk van Einstein stelde de uitvinding van de elektronenmicroscop door Müller ons voor het eerst in staan atomen rechtstreeks zichtbaar te maken.



Elke vlek op de foto stemt overeen met een atoom op het oppervlak van een zeer fijne metalen punt.

Tegenwoordig observeert men niet enkel atomen: men hanteert ze! Nieuwe visualisatietechnieken werden ontwikkeld: de tunnelingmicroscop die een quantumeffect van de materie gebruikt en die geschikt is voor het bestuderen van materialen en de microscoop die gebruik maakt van kernkracht die bestaat uit een naald die het reliëf van een oppervlak van zowel een geleider als een isolator kan volgen.

Deze microscopen stellen ons in staat nanotechnologieën te ontwikkelen. Dit is een geheel aan technieken met als doel het produceren en manipuleren van objecten en materialen op moleculaire en atomaire schaal, namelijk een nanometer (10^{-9} m = een miljoenste van een millimeter) groot. Deze nieuwe technieken openen nieuwe perspectieven, vooral in het onderzoek naar nieuwe materialen, in de geneeskunde, zowel voor de diagnosering als voor de dosering, en in de informatica omwille van hun mogelijkheden qua miniaturisatie. Men hoopt zelfs nanorobots te creëren die in staat zijn taken uit te voeren op atomair niveau.

Dergelijke uitzichten zouden ongetwijfeld bijgedragen hebben aan het goede humeur van Democritus, moest hij ze gekend hebben.

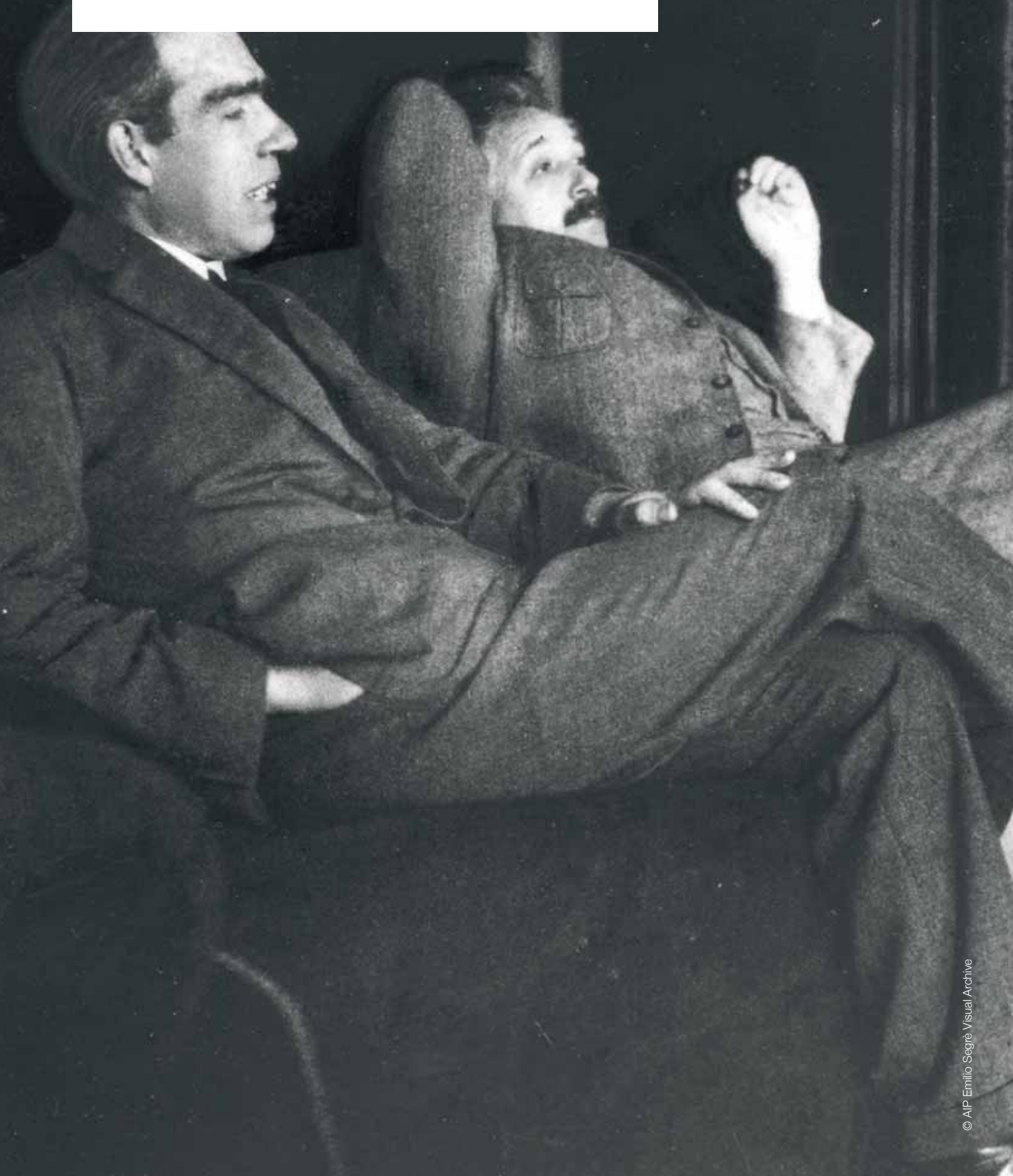
De veldeffect microscoop

Een puntvormige naald wordt in een ampule geplaatst die vacuüm wordt gehouden. Er blijft een druk over vanwege het edelgas van 10^{-3} pascal. Een positieve spanning wordt over de naald aangelegd. Zijn uiteinde genereert een sterk elektrisch veld (dit is het effect van een puntvormige geleider zoals bij een bliksemafleider). Dit elektrische veld is sterk genoeg om de gasatomen rond de naald te ioniseren. De zo gevormde ionen worden door het elektrische veld versneld en geprojecteerd op een scherm, waar ze een sterk vergroot beeld geven van de uiteinde van de naald.

De geboorte van de kwantum-mechanica

Henri Eisendrath

Professor Emeritus – Vrije Universiteit Brussel



Barsten in de klassieke tempel

De kwantumfysica is ongeveer een eeuw oud en daarom blikken we even terug op de natuurkunde uit die tijd (einde 19de eeuw). In de tempel van de fysica hadden twee heren een ereplaats: Isaac Newton (1642-1727) en James Maxwell (1831-1879).

De val van een appel, het ballet van de planeten rond de zon en het rond-draaien van het elektron in een magnetisch veld waren bewegingen die met de wetten van de mechanica van I. Newton heel precies konden voorspeld worden. Als voor een object de beginpositie en de beginsnelheid gekend waren, was de baan van dit object (in een gegeven krachtveld) volledig vastgelegd. Deze theorie was gekenmerkt door zijn determinisme.

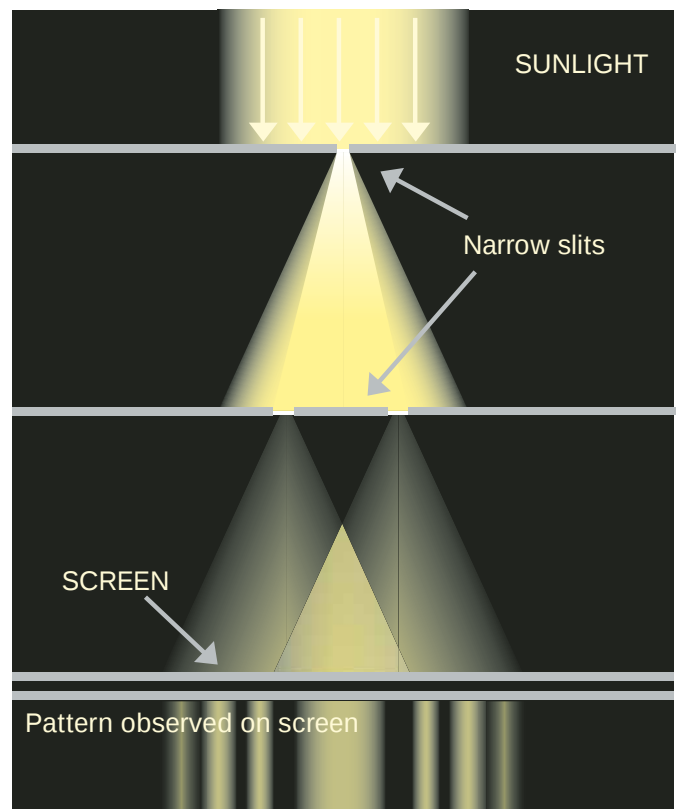
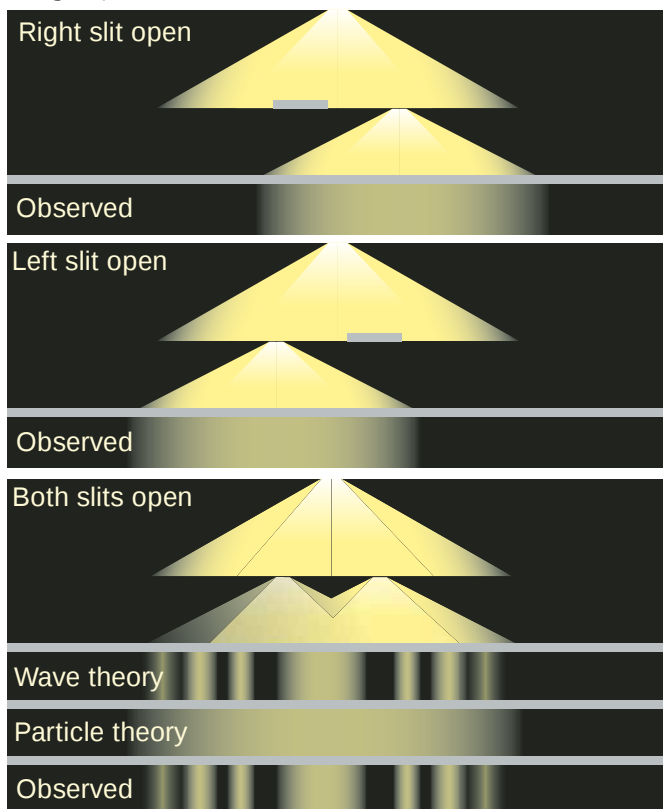
In een ander domein van de fysica slaagde J. Maxwell erin om de verklaringen van de elektrische en magnetische fenomenen te verenigen in één enkele theorie: het elektromagnetisme. Deze theorie voorspelde dat zowel het golfkarakter van elektromagnetische storingen als dat van hun voortplantingssnelheid gelijk is aan de lichtsnelheid. Dit suggereert dat licht - van de lage frequenties (zoals radiofrequenties) tot de hoge frequenties zoals gamma-stralen - ook een elektromagnetische sto-

ring is. Dat het licht een golf is, kan direct aangetoond worden met de merkwaardige proef van Young. In deze proef komt het interferentieverschijnsel - als essentiële eigenschap van golven - goed tot uiting. Een lichtstraal die door twee spleten gestuurd wordt, zal door interferentie op een scherm, niet twee maar heel wat lichtvlekken geven.

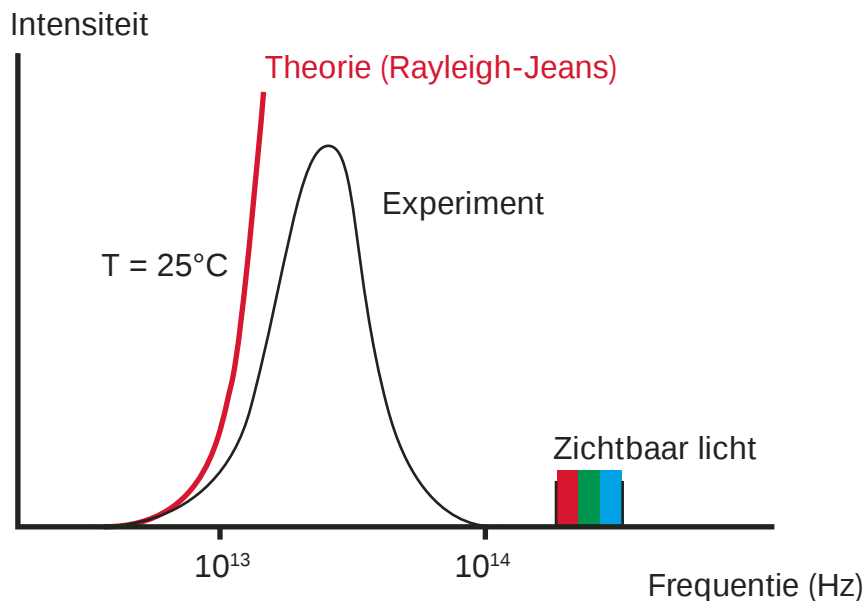
In de wanden van deze stevig gevestigde tempel verschenen eind 19de eeuw echter enkele barsten. Het was geweten dat elk lichaam energie uitstraalt onder de vorm van licht en de frequentie waarbij de meeste energie wordt uitgestraald evenredig is met de temperatuur. Het hoefijzer dat de smid bij 700°C uit het vuur haalt is rood. Warmt hij het verder op dan wordt het wit. Voor de energie uitgestraald door een lichaam bij kamertemperatuur ligt het maximum in het infrarood (IR) en deze is dus onzichtbaar voor onze ogen. 's Nachts kunnen we lichamen, die niet belicht worden, wel waarnemen met een IR-detector.

Volgens de klassieke theorieën (einde 19de eeuw: Maxwell en Newton) zouden we blind worden bij het bekijken van lichamen op kamertemperatuur en zeker van het hete hoefijzer. Men sprak over een UV catastrofe, omdat de theorie mank liep voor de elektromagnetische straling met korte

Young experiment



golflengtes. Velen, waaronder Gustav Kirchhoff (1824-1887), Jozef Stefan (1835-1893), Wilhelm Wien (1864-1928), Heinrich Rubens (1865-1922), interesseerden zich voor dit probleem van “zwarte lichaam straling”. Het kreeg deze naam omdat het probleem ontstond bij het beschouwen van de straling die uitgezonden werd door een lichaam dat het invallende licht niet reflecteert (een zwart lichaam dus). Onderzoekers uit die tijd hadden de klassieke theorieën ter beschikking: de Maxwell theorie (die een theorie van straling is) en de thermodynamica (als theorie van de warmte). Volgens deze goed gevestigde theorieën zou de uitgezonden straling, die in frequentie overeenkwam met de warmtebeweging van de ladingen in het **zwarte lichaam**, in elke frequentie kunnen voorkomen. Dit is de grond van het mislopen van de resultaten bij hoge frequenties.



Straling zwart lichaam

Het zwarte lichaam

Een geïdealiseerd zwart lichaam absorbeert alle straling (zichtbaar of onzichtbaar) die erop valt. En dit zonder iets van die straling te weerkaatsen of door te laten. Een dergelijk lichaam moet zelf straling uitzenden anders zou zijn temperatuur alsmat toenemen.

De thermodynamica toont dat de verdeling van de energie van een zwart lichaam als functie van de frequentie uitsluitend afhangt van de temperatuur en niet van de materie waaruit het zwart lichaam werd vervaardigd.

In praktijk vormt de binnenkant van een gesloten ruimte met een klein gaatje erin een zwart lichaam. De totale energie-uitstraling van het zwart lichaam is evenredig met de vierde macht van de temperatuur ($\propto T^4$); anderzijds verplaatst de maximale intensiteit van het zwarte straling zich naar hogere frequenties wanneer de temperatuur stijgt ($\propto T$). Bij kamertemperatuur bevindt de maximale intensiteit zich in het onzichtbare infrarood, terwijl de zon met haar oppervlakte-temperatuur van ongeveer 6000 graden, vooral zichtbaar licht naar ons toestuurt.

Op het einde van de 19de eeuw voorspelt geen enkele theorie een dergelijk maximum. De bestaande theorieën voorspellen bij elke temperatuur dat de intensiteit grenze-loos moet toenemen met de frequentie.

De kwantificatie van het licht

In 1900 stelde Max Planck (1858-1947), na een beredeneerde gok op de formule van het stralingsspectrum, een theoretische verklaring voor. Hij ontdekt dat de perfecte overeenkomst van theorie en experiment bereikt wordt als de toegestane energiewaarden van de uitgezonden EM golven niet continu, maar gekwantificeerd zijn. De energie is steeds een geheel veelvoud van de frequentie ν van de oscillator vermenigvuldigd met een constante h (hn)

$$E_n = nh\nu$$

(constante van Planck: $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ Js)

De uitgestraalde energie zou dus onderverdeeld zijn in pakketjes hn . Deze pakketjes zal men later kwanta noemen en vandaag kennen we deze als fotonen.

De theorie van Planck, die de finale oplossing van de straling van het zwart lichaam gaf, was het begin van een ware revolutie in de natuurkunde. Ze was echter niet naar de zin van vele fysici uit die tijd, net omdat deze theorie aanleiding gaf tot een hele nieuwe kijk op de natuur, die de tempel van de klassieke fysica liet daveren op haar grondvesten.

Met zijn nieuw inzicht legde Max Planck de eerste steen van een nieuwe mechanica die de natuur van het kleine beschrijft: de kwantummechanica.

Levend buiten de wetenschappelijke gemeenschap en werkend voor het Patentenbureau in Bern (Zwitserland) had Albert Einstein (1879-1955)

deze theorieën en problemen grondig bestudeerd. In 1905 gaat hij nog een stap verder. In één van de artikels die hij in dat jaar (annus mirabilis) publiceert, geeft hij een heel originele verklaring voor het foto-elektrisch effect.

De ontdekking van dit effect hebben we te danken aan Philip Lenard (1862-1947). Hij bedacht het volgende eenvoudig experiment. In een onderbroken stroomkring, met aan de uiteinden van de onderbrekingen stalen plaatjes, stuurt men op één van de plaatjes (de emitter) blauw licht. Met dit blauw licht worden elektronen uit het plaatje losgerukt en agetrokken door de collector. Het blauw licht zorgt er dus voor dat de onderbreking in de kring overbrugd wordt, waardoor een stroom doorheen de lus kan lopen. Deze stroom wordt waargenomen met een ampèremeter die in de lus geschakeld is. Met een grotere lichtintensiteit zal de elektrische stroom toeneemen (intensere licht zorgt ervoor dat meer ladingen de onderbreking kunnen overbruggen). Als men het plaatje gaat belichten met licht van een lagere frequentie, bijvoorbeeld rood licht, gaat de ampèremeter niet uitwijken, zelfs met grote licht-intensiteit.

Met enkel het golfkarakter van het licht kunnen we dit niet verklaren.

In 1905 gaat Einstein – in zijn verklaring voor het foto-elektrisch effect – een stap verder dan Planck. Hij stelt een deeltjesmodel op voor licht. Hij komt tot de veronderstelling dat niet alleen de energie van licht in pakketjes hn door een lichaam wordt uitgestraald, maar dat het licht zelf uit deeltjes met elk een energie hn bestaat. Wanneer nu in het foto-elektrisch effect het licht opgevat zou worden als een deeltjesstroom, zouden er bij hogere lichtintensiteit meer deeltjes zijn, maar zou elk lichtdeeltje afzonderlijk niet beter

of minder in staat zijn om elektronen los te rukken. Bij hogere frequenties zou ieder lichtdeeltje wel meer energie hebben en elektronen gemakkelijker losrukken aangezien een lichtdeeltje met hogere frequentie een hogere energie bevat.

Deze veronderstelling gaat heel de fysica op zijn kop zetten. Dit nieuwe model leek onverenigbaar met de bestaande golftheorie van Maxwell en was voor heel wat fysici erg storend. Robert Millikan (1868-1953) bevestigde de hypothese van Einstein experimenteel. De dualiteit van het licht moest op dat moment nog aanvaard worden. Even herinneren dat Einstein in 1922 de Nobelprijs 1921 kreeg voor zijn werk in verband met dit foto-elektrisch effect.

Kwantificatie van de materie

In dezelfde periode trachtten andere wetenschappers een atoommodel te bedenken dat de resultaten van experimenten, waarin de materie wordt bestraald, konden verklaren. Het op dat ogenblik algemeen aanvaarde atoommodel van J.J. Thomson (1856-1940) dateerde van 1903. Dit model stelde hij op na zijn ontdekking van het elektron. Thomson's atoommodel beschreef het atoom als een krentenbrood waar de negatieve ladingen (elektronen) als krenten waren in de positief geladen deeg van het brood. Op basis van de experimenten van J. Hans Geiger (1862-1945) en Ernest Rutherford waarin een metaalfolie met positieve ladingen wordt gebombardeerd (1909) komt Ernest Rutherford (1871-1937) in 1909 tot een gewijzigd atoommodel.

Het atoom zou de vorm van een miniatuur planetenstelsel hebben met de

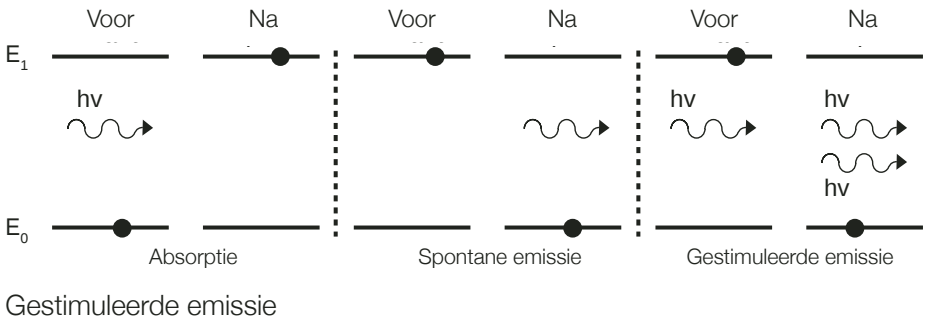
positieve kern in het centrum waar-
 rond negatieve elektronen bewegen.
 Men wist uit andere experimenten dat
 de beweging van de elektronen rond
 de kern gepaard moest gaan met
 een energieverlies, onder de vorm
 van straling. Met de instabiliteit van
 het atoom als gevolg. Toch waren de
 atomen stabiel!

Voor de stabilisatie beeldde Niels
 Bohr (1885-1962) zich in dat er een,
 tot dan toe onbekende, repulsieve
 kracht moest bestaan, die funda-
 menteel verschillend was van de
 andere krachten. Hij gaat daarom in
 zijn theorie een kwantumvoorwaarde
 invoeren: het elektron kan slechts op
 enkele, welbepaalde, banen (orbita-
 len) bewegen.

Bohr construeerde een atoommodel
 dat een verklaring kon geven voor de
 resultaten van de spectroscopisten.
 Voor hem gaat de absorptie of de
 emissie van licht (met frequentie ν)
 door een atoom, gepaard met een
 overgang van een elektron tussen
 twee orbitalen waarvoor het energie-
 verschil $h\nu$ is. Dit revolutionaire atoom-
 model (waterstofatoom) verscheen in
 1913. In 1922 kreeg Bohr hiervoor de
 Nobelprijs. In 1917 bouwde Einstein
 de brug tussen de kwantificatie van

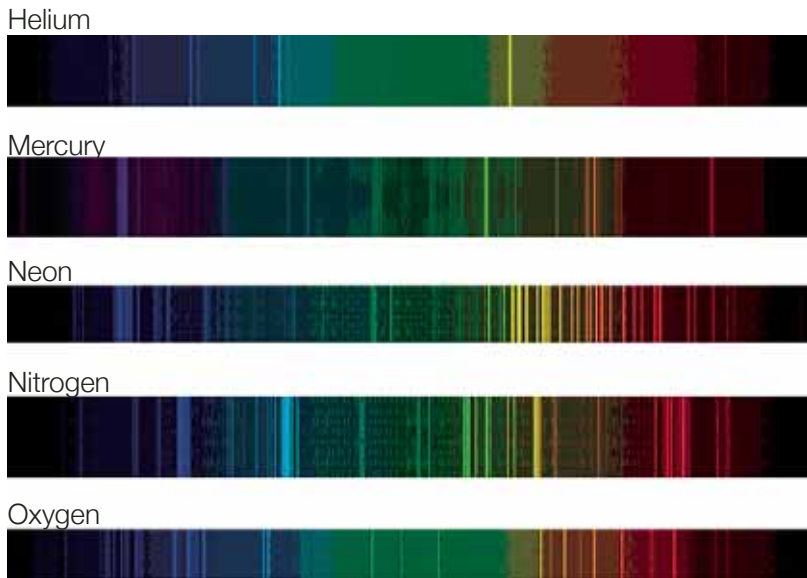
het licht en die van de materie. In een
 artikel van 1917 voorspelde Einstein
 dat er, naast de bekende processen
 (absorptie en spontane emissie) in de
 interactie tussen “licht en materie”,
 een derde proces mogelijk was. Het
 derde proces, de gestimuleerde emis-
 sie, zou ook toelaten om het Planck
 spectrum van het zwart lichaam vol-
 ledig te verklaren. De gestimuleerde
 emissie is net wat aan de grond ligt
 van de fysica van een LASER-bron.

In het atoommodel van Bohr moet
 een elektron bewegen op welbepaal-
 de banen (orbitalen), met elk bepaal-
 de energie ($E_0, E_1, \dots$) en kan het
 overgaan van de ene baan naar de
 andere mits emissie of absorptie van
 een foton met overeenkomstig ener-
 gieverschil ($h\nu = E_1 - E_0$). In de gesti-
 muleerde emissie zal het elektron in
 interactie met het invallend foton ($h\nu$)
 in een andere toestand met een lage-
 re energie ($E_1 - h\nu$) terechtkomen, dit
 door uitzenden van een nieuw, iden-
 tiek, foton.



De bal was aan het rollen. In 1923
 verdedigde Louis de Broglie (1892-
 1987) zijn doctoraats-thesis waarin
 hij de “golf-deeltje” dualiteit voor licht
 veralgemeende voor de materie en in
 het bijzonder voor elektronen.

Elektronen zouden naast hun deel-
 tjeskarakter ook een golfkarakter
 hebben. Als direct gevolg van het
 golfkarakter van de elektronen, zou
 een elektronenbundel, die invalt
 op een dubbele spleet, aanleiding
 geven tot een interferentiepatroon.
 Het Young experiment (dubbelspleet
 experiment dat golven karakteriseert)
 met elektronen werd voor het eerst
 met succes uitgevoerd in 1927 door
 George Thomson (1892-1975/zoon
 van J.J. Thomson).



Spectra voor enkele atomen

Dualiteit voor allen

In de interactie van licht en materie gedragen beiden (zowel het licht als de materie) zich simultaan als golf en als deeltjes. Verrassend maar we zitten nu wel in de ongewone wereld van het extreem kleine. Deze dualiteit is een hoeksteen voor de kwantummechanica. Elektronen rond de kern gedragen zich niet volgens de wetten van de mechanica van Newton. Welke wetten of welk formalisme gelden dan wel in de wereld van het extreem kleine?

In 1926 ontwikkelde Erwin Schrödinger (1887-1961) een eerste formalisme waar het golf-karakter van de materie centraal staat. In 1925 schrijft Werner Heisenberg (1901-1976) zijn artikel met een andere aanpak van de problematiek. In 1927 stelde hij het onzekerheidsprincipe voor waarbij hij beweerde dat in een meting de positie en de snelheid, beide niet simultaan, met volledige zekerheid gekend kunnen zijn. In 1928 formuleerde Paul Dirac (1902-1984) de kwantummechanica zodanig dat ook de speciale relativiteit gere-spec-teerd bleef. De vierde musketier die bijdraagt aan de vormgeving van een coherent formalisme voor het gedrag van deze deeltjes in de wereld van het extreem kleine is Max Born (1882-1970). Hij verduidelijkt de betekenis van de golfvergelijkingen, toonde dat de dualiteit een einde betekende voor het deterministisch karakter van de klassieke fysica.

God speelt niet met teerlingen

De kwantummechanica is geen theorie van zekerheden, het beschrijft de wereld in termen van waarschijnlijkheden.

Het onzekerheidsprincipe en de dood van het determinisme werd niet door iedereen aanvaard. Albert Einstein was, hoe eigenaardig dit ook kan zijn, bij de grootste tegenstanders!

Op het Solvay Congres van 1927 (Hotel Metropole – Brussel) daagt Albert Einstein Niels Bohr uit met een gedachtenexperiment. Einstein verwachtte dat het onzekerheidsprincipe zou sneuvelen. *“God speelt niet met teerlingen”*. Na een slapeloze nacht kwam Bohr met een antwoord waarin het probabilistische karakter van de kwantummechanica zegevierde: *“Wie denk je dat je bent (Albert), om god te vertellen wat hij moet doen?”*

Hoewel Albert Einstein helemaal niet gelukkig was met dit onzekerheidsprincipe moest hij de verklaring van Bohr wel aanvaarden.

Dit onzekerheidsprincipe blijft Einstein achtervolgen. In 1935 schreef Einstein samen met Boris Podolsky (1896-1966) en Nathan Rosen (1909-1995) een artikel dat kortweg EPR-artikel werd genoemd. 70 jaar later geeft dit artikel aanleiding tot nieuwe discussies en onderzoek in de kwantummechanica. De eindconclusie van het EPR-artikel is dat de kwantummechanische beschrijving van de realiteit met behulp van de golf functie niet compleet kan zijn. De drie laten het in het midden of er een complete beschrijving van de werkelijkheid bestaat. Zij geloven er in. Het is John Bell (1928-1999) die in 1964 de wetenschappers wijst op



E. Schrödinger



W. Heisenberg



Paul A. Dirac



M. Born

het EPR-artikel en discussies over de interpretatie van de kwantum-mechanica gaat opwak-keren. Hierop volgden een ganse reeks van EPR/Bell experimenten o.a. de teleportatie. De kwantummechanica werd er steeds bevestigd.

De kwantummechanica gaf geboorte aan heel wat technologieën. Technologieën die vandaag in de industrie en geneeskunde zijn binnengedrongen en ons helpen in het dagelijkse leven. De elektronenmicroscopie is één van de toepassingen. De kwantummechanica gaf ook een verklaring voor het gedrag van de halfgeleiders en deed zo de deur open voor nieuwe ontwikkelingen van de elektronica en later micro-elektronica. Vandaag steekt men in een chip 100 miljoen transistoren. Aan de basis van de laser ligt de gestimuleerde emissie, ontdekt door Einstein. Toen de eerste laser gebouwd was geloofde de wetenschappers niet erg in de concrete toepassingen. Met de laser worden nu in de industrie dikke metalen platen gesneden, doorboord en gelast. De laser kende ook een belangrijke doorbraak in verschillende takken van de geneeskunde. De meest verspreide is de behandeling van verschillende pathologieën van het oog. Ook het supergeleidende karakter van zekere stoffen beneden een bepaalde temperatuur vindt zijn verklaring in deze theorie. Misschien reizen we morgen in treinen die zich wrijvingsloos boven supergeleiden- de rails verplaatsen. Ook de klinisch magnetische resonantie beeldvorming zou vandaag niet bestaan zonder een duidelijk kwantum-mechanisch inzicht van de basisfenomenen voor deze technologie. Hierbij hebben we nog niet gesproken over de informatica en alle audiovisuele apparatuur zoals CD, DVD, Morgen werken we denkkelijk met een kwantumcomputer.

Dit zijn maar enkele voorbeelden van de belangrijke impact die de kwantum-mechanica heeft gehad op het maatschappelijke gebeuren

Kwanta en ons dagelijks leven

Elektronica, de laser, ... De lijst met toepassingsgebieden gebaseerd op de merkwaardige eigenschappen van kwanta is lang: communicatie, informatica, televisie, muziek, beeld, industrie, transport, medische beeldvorming ... en misschien in de toekomst kwantum computers en cryptografie!

Wat is de kwantum-teleportatie?

In het EPR-artikel werd een eigenaardige eigenschap van de kwantum-mechanica besproken. Men noemt die eigenschap de "niet lokaliteit". Om dit te illustreren stel je je twee personen voor die kop of munt spelen. An zit in Brussel, Piet in Sidney. Indien de muntstukken de wetten van de kwantum-mechanica volgen en indien ze in een specifieke toestand worden voorbereid, dan mag An zeker zijn dat, indien zij kop (munt) bekommt, Piet op hetzelfde moment ook kop (munt) bekommt. Men noemt de toestand "verstrengelde toestand" en deze kunnen gebruikt worden om op afstand en zonder materie-transport kopieën te maken van kwantumobjecten, zoals atomen. Men noemt dit de kwantum-teleportatie. Is dat niet verbazend!

1. Leven en dood van sterren

Deze gaswolk, overblijfsel van een ster, bevindt zich ongeveer 3000 lichtjaren van de Aarde. Het uitgezonden licht is als een kwantumvingerafdruk van de atomaire samenstelling. Op de foto is waterstof in rood, zuurstof in groen en zwavel in blauw aangegeven.

2. Een ganse processor op één enkele chip

Transistoren, als kwantum-object, worden jaar na jaar kleiner en kleiner. Vandaag, kunnen op één chip zo'n 100 miljoen transistoren per cm² geplaatst worden.

3. Magnetische Resonantie Beeldvorming

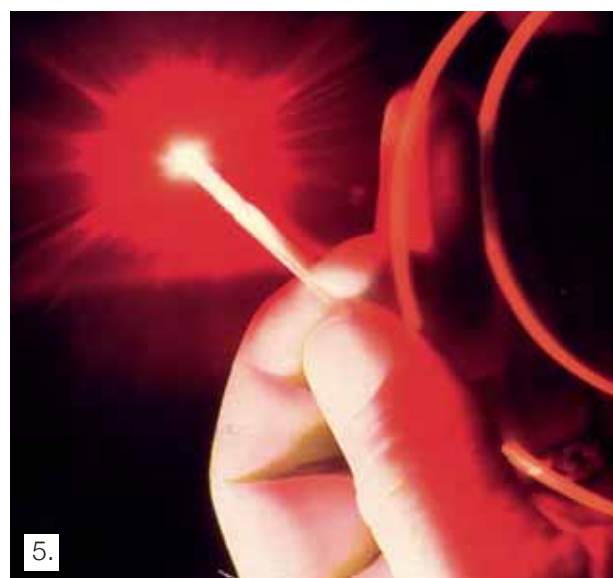
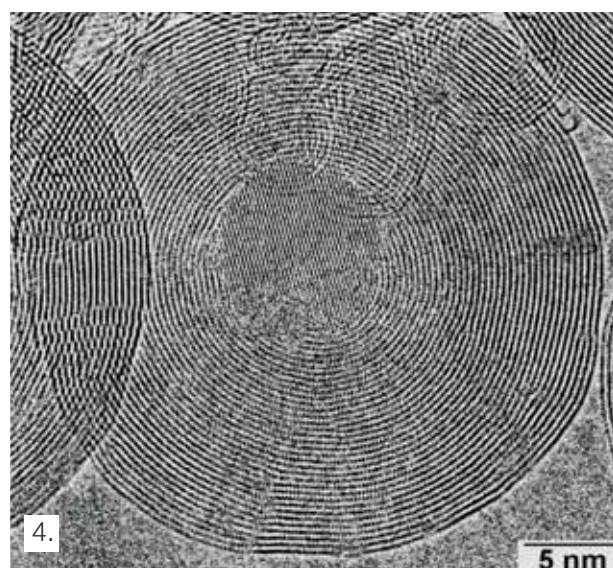
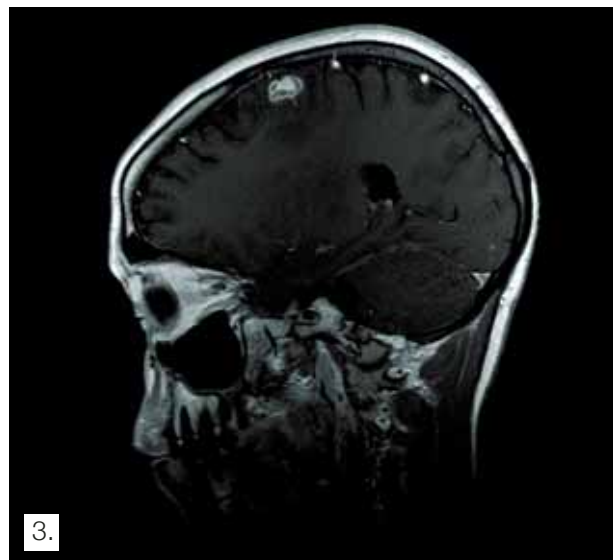
Waterstofatomen, geplaatst in een magnetisch veld en onderworpen aan elektromagnetische straling, zenden een signaal uit dat afhankelijk is van de aard van het weefsel van het lichaam waarin ze zich bevinden. Door deze signalen te localiseren kan een beeld gereconstrueerd worden, bijvoorbeeld hier het beeld van een hoofd.

4. Beeld van een diamant door een elektronenmicroscopie

Dit beeld op nanometerschaal, zo'n tien keer de afmeting van een atoom, toont koolstofatomen. In de gearceerde cirkel bevindt zich diamant, deze werd kunstmatig gevormd door de buitenste koolstoflagen te bombarderen met elektronen.

5. Meer en verder met de laser

De werking van een laser is gebaseerd op de ontdekking door Einstein van gestimuleerde emissie van licht. Met laserlicht kunnen meer dan duizend telefoongesprekken tegelijkertijd door één optische vezel verstuurd worden

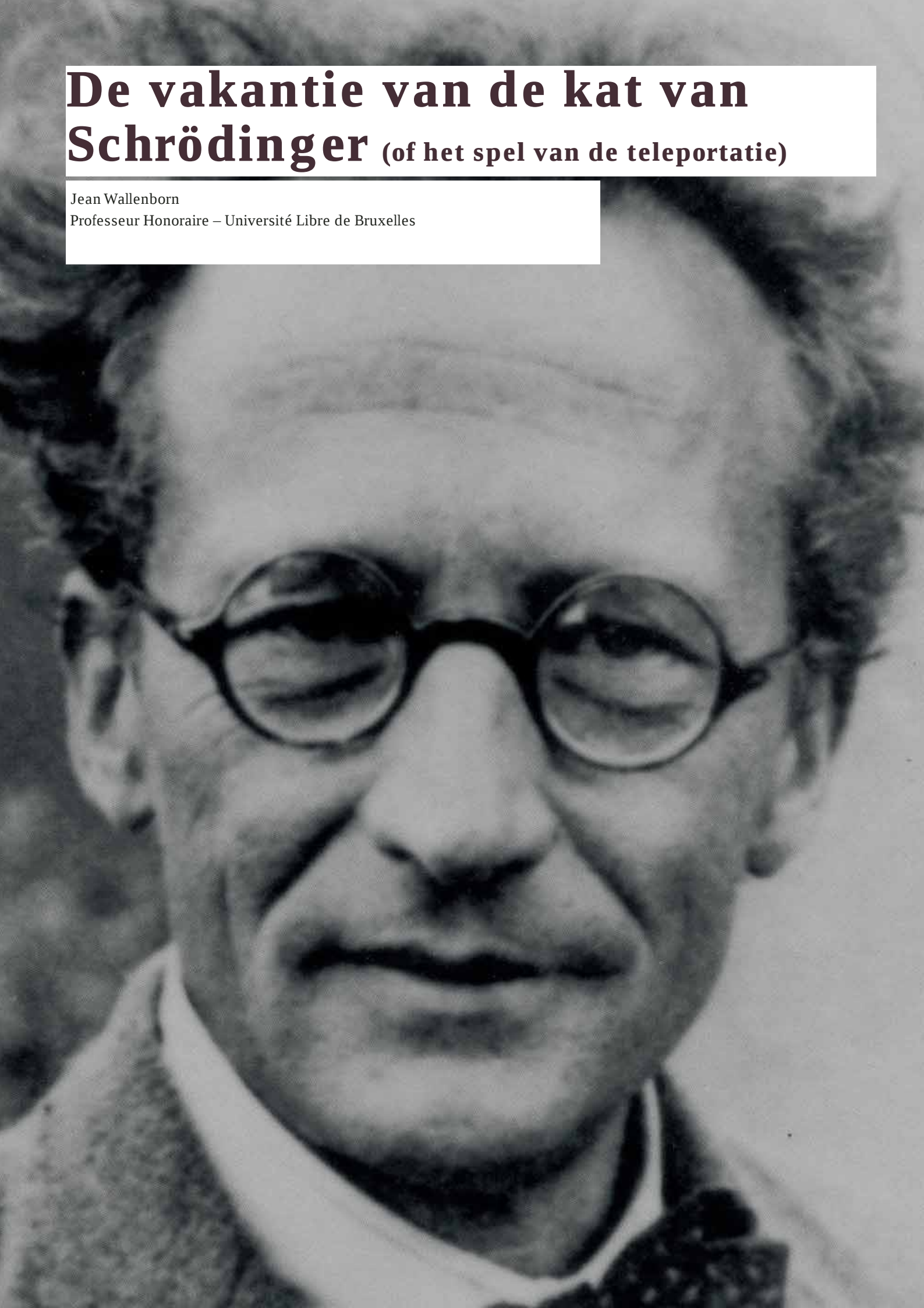


Met oprechte en gewaardeerde dank aan Caroline Verhoeven,
Alex Borgoo en Monica Weckx

De vakantie van de kat van Schrödinger (of het spel van de teleportatie)

Jean Wallenborn

Professeur Honoraire – Université Libre de Bruxelles



Minou, de kat van Erwin Schrödinger, ontsnapte aan een experiment uitgevonden door zijn baasje. Hij (de kat) bleef verschillende dagen opgesloten in een doos waarin het kwantum toeval het dier moest doden of laten leven. Het toeval was de kat gunstig gezind, want toen Schrödinger de doos opende verscheen de kat levend en in goede gezondheid

Zijn meesters, op het punt om op vakantie te vertrekken, willen de kat niet achterlaten na de ervaring die ze heeft ondergaan en zijn van plan om ze mee te nemen. Op het moment van vertrek echter blijkt Minou een vreemde ziekte te hebben gekregen: nu eens is ze hier, dan weer daar; op elk moment dat men ze bekijkt, verdwijnt ze om elders terug te verschijnen; indien men ze wil pakken schijnt het lichaam zich op te lossen en zich elders terug samen te stellen.

Aan welke ziekte lijdt Minou?

Na de ervaring in de doos heeft Minou een kwantumeigenschap behouden. Op grond van het onzekerheidsprincipe van Heisenberg is het onmogelijk om tegelijkertijd haar positie en haar snelheid te kennen. Het is bijgevolg onmogelijk om haar te vinden op een precies bepaalde plaats voor meer dan een fractie van een seconde.

Ziedaar Medor, een vuile keffer die iets heeft tegen alle katten in deze wereld. Hij aarzelt geen seconde om aan te vallen¹: een beet aan de kat, een slag van een klauw aan de neus van de hond en een hoop geluidshinder. De Schrödingers profiteren van het geruzie om de kat te recupereren: ze kunnen op vakantie vertrekken.

Wat wilde Schrödinger aantonen met dit (gedachte-) experiment?

Schrödinger wilde de gevolgen van de waarschijnlijkheidsinterpretatie van de kwantummechanica niet accepteren. In het bijzonder die interpretatie die stelde dat indien een systeem in verschillende toestanden kan verkeren, dan kan het tegelijkertijd in al die toestanden verkeren, zolang er geen meting is uitgevoerd. Om er de absurditeit van te demonstreren bedacht hij een experiment waarin een kat werd opgesloten in een doos met een cyaancapsule. Deze kan gebroken worden door een systeem verbonden aan de desintegratie van een atoom, een puur toevallig kwantumfenomeen. Zolang men niet weet of de desintegratie heeft plaats gevonden is de kat in een toestand van superpositie “dood en levend” of “noch dood, noch levend”. Enkel een ervaring kan de ambiguïteit opheffen. Hier bestaat die uit het openen van de doos.

We moeten opmerken dat Einstein voor Schrödinger praktisch hetzelfde experiment heeft voorgesteld, waarbij evenwel de kat werd vervangen door een ton met poeder.

Wanneer ze aangekomen zijn in hun vakantieverblijf stellen ze vast dat ze zich helaas vergist hebben, het is niet Minou die ze gerecupereerd hebben maar een andere kat, Raminagrobis, met een zuur karakter, die niet aarzelt om de kinderen te krabben. Onmiddellijk bellen ze naar een buurman om te vragen Minou te trachten terug te vinden. Gedurende het gesprek stelt Erwin Schrödinger vast dat Raminagrobis elke keer van kleur verandert wanneer hij naar de kat kijkt. De buurman is verbaasd omdat Medor, die in de hoek op zoek is naar moeilijkheden, van kleur verandert telkens hij er naar kijkt. Nog eigenaardiger is dat Erwin en de buur vaststellen dat de kat en de hond telkens dezelfde kleur hebben: als Raminagrobis zwart is of paars, dan is Medor ook zwart of paars, en wel op hetzelfde ogenblik

¹ Het blijkt dus dat honden oneindig veel snellere reflexen hebben dan mensen.

Na deze intermezzos herverschijnt Minou, nu met een ondefinieerbare kleur. Erwin, die vaststelt dat alle voorwaarden vervuld zijn, beslist dan om Minou te teleporteren vanuit de woonplaats naar hun huidige verblijfplaats. De operatie is niet zonder gevaar, want indien de teleportatie mislukt, dan zal Minou volledig veranderen en onherkenbaar zijn. Maar Minou heeft al andere zaken meegeemaakt sinds ze opgesloten werd in een doos met een cyaancapsule.

Erwin stelt een protocol voor om de teleportatie te laten slagen en dit wordt letterlijk gevolgd:

1) De buurman meet een speciale combinatie van de kleuren van Medor en Minou zonder evenwel de kleur van de kat en deze van de hond individueel te bepalen. Minou schijnt te worden afgebroken en verdwijnt. De hond ziet er groggy uit.

2) De buurman telefoneert aan Erwin het resultaat van zijn meting.

3) Erwin stelt de toestand van Raminagrobis bij door diens staart over een geschikte hoek te draaien. Raminagrobis wordt een getrouwe copie van Minou.

Er werd totaal geen materie overgedragen. Alleen werd de toestand van Minou overgedragen op Raminagrobis die zijn atomen leverde om Minou te worden.

Het slechte humeur van Raminagrobis is verdwenen. Minou laat zich door de familie Schrödinger vertroetelen.

Welk is de besmettelijke ziekte die de hond en de kat hebben opgelopen?

Na hun (gewelddadige) interactie zijn de toestanden van Raminagrobis en van Medor zijn verstrengeld (of verbonden). De verstrengeling (apart maar verbonden voorkomen) is een zuiver kwantum fenomeen waarin de kwantumtoestanden van twee of meer objecten niet onafhankelijk kunnen worden beschreven, d.w.z. ze zijn gecorreleerd, zelfs indien de objecten van elkaar verwijderd zijn. Ze gedragen zich alsof ze uit één enkel object bestaan. Het verstrengelingsfenomeen ligt aan de basis van nieuwe technologieën zoals de kwantumcryptografie, de kwantumcomputers en de teleportatie.

Het was in 1935 dat Einstein, Podolsky en Rosen de aandacht vestigden op de verstrengelingstoestanden die van de kwantumtheorie een niet lokale theorie maken. Volgens hen toonde dit aan dat de theorie onvolledig was en dat ze moest ondersteund worden door verborgen veranderlijken. In 1965 toonde J. Bell aan dat het mogelijk was om na te gaan of die verborgen veranderlijken bestonden. Experimenten, in 1981 uitgevoerd door A. Aspect, toonden definitief aan dat deze verborgen veranderlijken niet bestonden en dus dat de kwantummechanica een niet lokaal karakter heeft.

Waarom kun jij je kat niet teleporteren?

Het teleportatieprotocol dat hierboven beschreven werd is gebruikt geweest om de toestand van een foton (lichtdeeltje) te teleporteren over verschillende kilometers en een energietoestand van een atoom over enkele micrometer.

Merk op dat er geen enkel deeltje verplaatst werd tijdens het eigenlijke teleportatieproces en dat na het beëindigen van het proces de geteleporteerde toestand vernietigd is bij het deeltje die die oorspronkelijk bezat. Aan de andere kant is communicatie nodig langs een klassieke weg (hier de telefoon) wat verhindert dat de informatie sneller dan het licht wordt overgedragen, wat in tegenstrijd zou zijn met de relativiteit.

De atomen en de fotonen zijn deeltjes die de wetten van de kwantummechanica gehoorzamen. Deze laten intrigerende eigenschappen toe zoals de gelijktijdige toestanden en de teleportatie, waarvan de interpretatie nog niet unaniem aanvaard wordt door alle fysici.

Er is weinig kans dat onze kat kwantumeigenschappen zal verwerven. Inderdaad, wanneer er verschillende deeltjes interageren verliezen ze hun kwantumeigenschappen en wel sneller naar mate er meer deeltjes zijn. Dit noemt men niet-coherent zijn. Er is geen twijfel mogelijk dat er een enorm aantal onderling verbonden deeltjes nodig is om een kat te maken en dat de kat behoort tot de klassieke wereld waaraan we gewoon zijn.

De teleportatie van een kat behoort daarom (nog) tot het rijk van de science-fiction.

Dank aan Caroline Verhoeven en Thomas Durt die me op dit onderwerp gebracht hebben en aan Nicolas Cerf voor zijn aanwijzingen en raad.

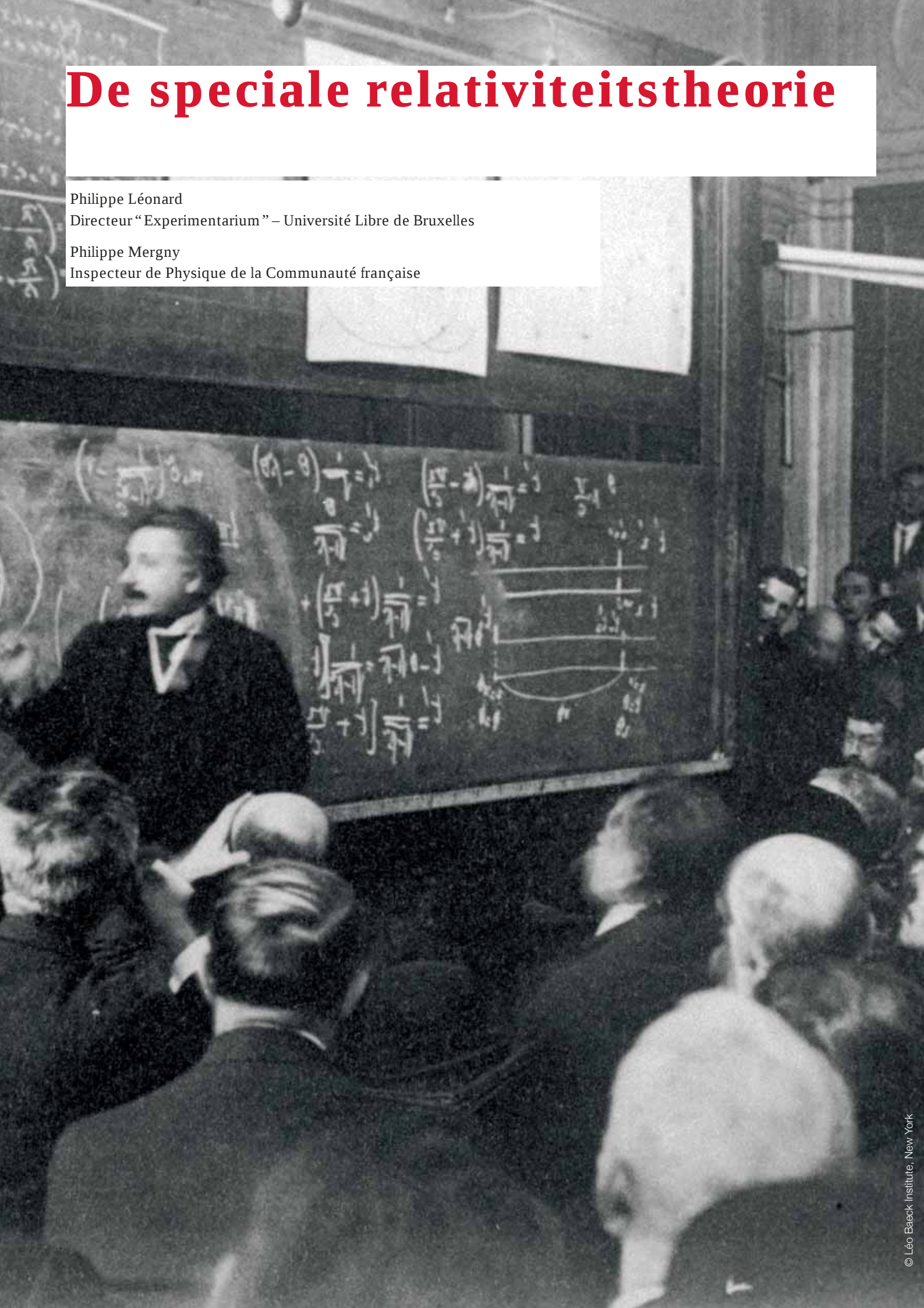
De speciale relativiteitstheorie

Philippe Léonard

Directeur "Experimentarium" – Université Libre de Bruxelles

Philippe Mergny

Inspecteur de Physique de la Communauté française



Het relativiteitsprincipe

Toen Galilei in het begin van de 17de eeuw de vraag stelde waar een steen zou vallen die losgelaten werd vanaf het kraaiennest van een boot die zich met constante snelheid verplaatste en volgens een rechte lijn op zee, namelijk aan de voet van de mast, ervoor of erachter, was hij op zoek naar een eenheid in de fysische beschrijving van bewegingen.

Alles is relatief! ?

In het begin van de 20de eeuw was het woord relativiteit zodanig in de mode dat we ons vandaag zonder moeite kunnen inbeelden hoe lanterfanter argumenten uitwisselden waarbij de uitspraak “alles is relatief” een manier was om een discussie te sluiten, om daardoor opnieuw een bijna nonchalant fatalisme in te voeren. In plaats van de relativiteit der dingen te bewijzen zoals de naam ons laat denken, heeft deze theorie, die een revolutie in de fysica teweegbracht, vooral als onderwerp de bepaling van het absolute karakter!

We zijn op een boot met de naam Aarde, en wanneer we een voorwerp loslaten valt het eenvoudigweg aan onze voeten ondanks de hallucinante snelheid van de boot die ons draagt (300m/s draaiend naar het oosten op onze breedte, 30km/s in de baan om de zon en 300km/s rond het centrum van de Melkweg, onze galaxie¹).

De conclusie van deze directe vraag is dat het blijkbaar onmogelijk is om met de wetten van de fysica een onderscheid te maken tussen boten die ten opzichte van elkaar een eenparige rechtlijnige beweging (ERB) maken. Of met andere woorden, het is in dat geval onmogelijk de snelheid van de boot te observeren. Wanneer Isaac Newton zijn visie vertelt op de vallende appels is hij niet minder absoluut. Het grensoverschrijdende van zijn idee is dat hij stelde dat de kracht die de appel laat vallen dezelfde is die de Maan rond de Aarde doet draaien. Ziehier een volledig nieuwe fysica die haar bestaan wettigt door de eenheid tussen de wetten van de hemelbewegingen en de bewegingswetten op aarde. De zwaartekracht “uitgevonden” door Newton is een universele oefening. In plaats van te relativiseren, is het vooral een unificatie van de toepassingsgebieden van de wetten van de fysica op het gehele universum.

Nul en oneindig

De snelheid van een bewegend voorwerp gemeten door 2 waarnemers op verschillende boten zal over het algemeen verschillend zijn, en de optelwet van Galileo is eenvoudig: indien je een voorbijganger waarneemt die aan 4km/u op een rollend tapijt wandelt dat zelf in de wandelrichting rolt met een snelheid van 2km/u, dan lijkt de wandelaar zich ten opzichte van jou voort te bewegen met een snelheid van 6 (= 4+2) km/u.

Nochtans, toen uiteindelijk de snelheid van het licht in het luchtledige, kortweg c geschreven en met een waarde van ongeveer 300.000 km/s⁽²⁾, werd gemeten (door Fizeau en Foucault in Parijs), werd het tijd om de vraag te stellen of die met 30km/s zou toenemen in de richting van de rotatie van de Aarde, of 30km/s minder zou zijn in de tegengestelde richting. In 1880 probeerde de Amerikaan Michelson dit verschil te detecteren en faalde daarin ondanks de extreme gevoeligheid van zijn experimentele opstelling. Alles gebeurde blijkbaar alsof de lichtsnelheid de rol van oneindig speelde in de optelregel van Galilei: $\infty + 30 = \infty$!!! Vijftientig jaar van collectief herkauwen volgden.

Maar hoe moet ik dan snelheden optellen?

Indien de snelheid v is ten opzichte van een coördinatiestelsel dat zelf met een snelheid w beweegt ten opzichte van jou, dan is de eerste snelheid ten opzichte van jou, u , zodanig dat:

$$u = \frac{w+v}{1 + \frac{w \cdot v}{c^2}}$$

wat leidt tot $u = c$ als $v = c$.

¹Indien de duur van de waarneming niet te lang is, dan kunnen de verschillende bewegingen van de aarde als eenparig rechtlijnige bewegingen (ERB) worden beschouwd.

²De preciese waarde van c is 299 792,458 km/s.

Annus mirabilis

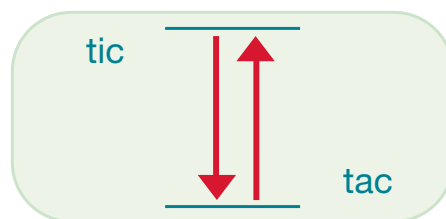
In 1905, een buitengewoon jaar, stelde Albert Einstein voor om het probleem om te draaien en als onveranderlijke basis de snelheid van het licht in het luchtledige te nemen samen met het principe van de Galileese relativiteit, maar dan geldend voor alle domeinen van de fysica, mechanica, optica en ook het elektromagnetisme. Het feit dat de snelheid van het licht een constante is maakt noodzakelijkerwijze dat als elementair beschouwde verschijnselen, zoals het meten van de tijd, of van de ruimte, of de gelijktijdigheid van 2 gebeurtenissen, rare uitkomsten vertonen.

Inderdaad, de lichtsnelheid beschrijft strikt het meten van de door het licht afgelegde afstand per tijdseenheid. Indien deze snelheid constant moet blijven in alle omstandigheden, dan zijn de metingen van de lengte van objecten en deze van duur niet dezelfde voor allen. De snelheid van het licht wordt een absolute grootte; de metingen van tijd en lengte worden relatief.

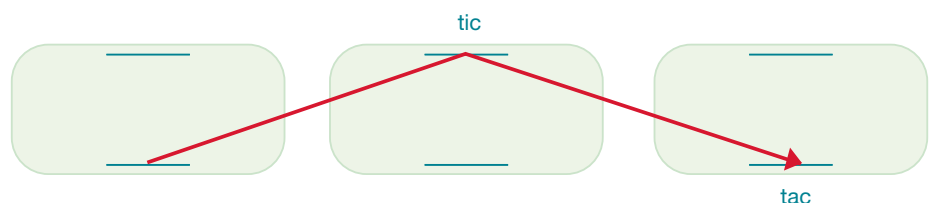
Worden seconden uren?

In het gewone leven merken we regelmatig dat de tijd schijnbaar traag voorbij gaat wanneer we ons vervelen, terwijl hij voorbij vliegt wanneer we druk bezig zijn. Is het dat wat Einstein bedoelt wanneer hij zegt: de tijd is relatief? Helemaal niet. De relativiteit introduceert integendeel een relatie tussen de tijden gemeten door de klokken van twee waarnemers die ten opzichte van elkaar bewegen; een relatie die geen eenvoudige gelijkheid is.

Om dit te begrijpen stellen we ons twee perfecte klokken voor, identiek en synchroon, in twee voertuigen. Deze klokken, van een nieuw type, hebben een tic-tac aangedreven door een lichtbundel die heen en weer beweegt tussen twee evenwijdige spiegels die aan de deuren van de auto vastzitten.



De eerste auto blijft bewegingsloos aan de rand van de weg staan en de chauffeur neemt de andere wagen waar die naar rechts voorbij rijdt met een constante snelheid v . Het relativiteitsprincipe garandeert ons dat de klok van auto nr2 normaal functioneert: het licht gaat over en weer.



(In de figuur is de snelheid van de auto sterk overdreven in vergelijking met de lichtsnelheid³)

Wat ziet de stilstaande chauffeur? Omdat de voortbewegingssnelheid van het licht onveranderlijk blijft, en omdat dat licht een langere afstand moet afleggen dan deze tussen de 2 spiegels (tussen de "tik" en de "tak"), moeten we noodgedwongen accepteren dat de corresponderende duur ook verlengd wordt. Onze stilstaande chauffeur is helemaal in de war: hoewel zijn eigen klok normaal schijnt te tikken, ziet hij deze in de bewegende auto trager functioneren! De tijd van de bewegende chauffeur is schijnbaar uitgerekt! We kunnen ook al voorspellen dat, indien de snelheid van wagen 2 gelijk is aan de lichtsnelheid, dat het getiktak van diens klok schijnbaar ophoudt: de tijd lijkt gestopt te zijn!

Ondervragen we nu de chauffeur van wagen nr2: zijn horloge functioneert perfect, alles is normaal, met elke seconde een mooie tik-tak. Het landschap glijdt voorbij en, gelijk met het landschap, een wagen in tegengestelde richting, met snelheid v . Ook die wagen heeft een lichtklok. Verassing: deze klok tikt duidelijk trager dan de zijne!

De paradox is dat indien de chauffeurs tweelingen zijn, elkeen de ander langzamer ziet verouderen dan zichzelf, daar waar de ander op zijn beurt dezelfde indruk heeft⁴.

³De contractie van de lengte-afmetingen zijn niet weergegeven in dit schema.

⁴Dit is de tweelingparadox ofwel de paradox van Langevin genoemd.

Hoe kun je de tijdsverlenging of tijdsdilatatie berekenen?

Men definieert de factor γ zodanig dat:

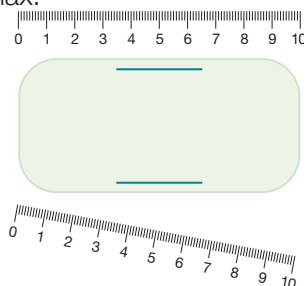
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

En de tijdsdilatatie is bijgevolg $T = \gamma T_0$ met T_0 de eigen tijd die gemeten wordt in het stelsel waar de klok in rust is.

Indien $v = c$, dan wordt T oneindig.

Zijn wij dwegen gedragen op de schouders van bewegende reuzen?

Laten wij ons concentreren op de meting die de eerste chauffeur kon uitvoeren van de lengte van zijn eigen auto. Door te profiteren van het voorbij komen van auto 2 aan een snelheid v , kan hij achtereenvolgens noteren op welk ogenblik de voorkant van die auto zijn achterkant passeert, en vervolgens wanneer de voorkant wordt bereikt. De lengte van zijn auto is dan $L_0 = v \cdot \Delta t$ où Δt waarbij Δt het gemeten tijdsinterval is. Indien echter de tweede chauffeur op precies dezelfde manier de lengte van wagen 1 meet – we herinneren eraan dat hij zich in stilstand waant en het landschap naar hem ziet komen met een snelheid v , ziet hij die voorbij komen in een kortere tijd $\Delta t' / \gamma$ ⁵. Zijn meting, $L = v \cdot \Delta t' / \gamma$, geeft een kortere lengte dan die bekomen door chauffeur nr1. Dit is de contractie van lengte. Het omgekeerde is eveneens waar: de 2 chauffeurs-waarnemers zijn het niet eens over de lengte van wagen nr2: de 1ste chauffeur ziet die korter dan de meting uitgevoerd door chauffeur nr2. Let wel, de lengte is schijnbaar korter naarmate de tijd langer is. Dit effect beïnvloedt echter alleen de dimensies in de bewegingsrichting. Alles gebeurt alsof de meeteenheden die door de beide chauffeurs gebruikt worden niet samenvallen: een soort vervorming zoals wanneer een meting uitgevoerd wordt met een parallax.



Waarom is deze theorie speciaal?

Omdat de symmetrieën die hierboven beschreven worden gelden voor waarnemers in ERB ten opzichte van elkaar. In de algemene relativiteitstheorie zal Einstein de relativiteit bestuderen tussen waarnemers die versneld ten opzichte van elkaar bewegen.

Is de theorie gecontroleerd?

De effecten van tijdsvertragingen werden geverifieerd bij muons, elektrisch geladen deeltjes die lijken op zware elektronen. Deze deeltjes worden door kosmische stralen geproduceerd in de bovenste lagen van de atmosfeer, en we weten dat ze zeer snel desintegreren (in ongeveer $2 \mu s$) terwijl ze waargenomen kunnen worden op lage hoogte. In de aardse atmosfeer is hun snelheid dicht bij c zodat de deeltjes slechts een afstand kunnen afleggen van $3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 600$ meter alvorens te desintegreren. Omdat we ze in de buurt van het aardoppervlak kunnen waarnemen moet hun levensduur aanzienlijk verlengd zijn.

Vanuit het standpunt van de muons zelf, is hun levensduur $2 \mu s$, maar is de dikte van aardatmosfeer verkort (tot 600m).

⁵ Door de tijdsdilatatie.

$E = mc^2$ onder de loep

Jan Heyninck

IWT - Doctoraatsstudent in de Wetenschappen – Vrije Universiteit Brussel



Oorsprong en betekenis van $E=mc^2$

Omzetting van massa naar energie

“Waarom denk je bij de naam Einstein?”

Vele mensen zullen op deze vraag eerlijk moeten antwoorden:

“ E is m c kwadraat, mijnheer...”

Deze formule is hoogst waarschijnlijk de meest beroemde fysische vergelijking ooit. Toch zullen slechts weinigen je ook kunnen vertellen waarvoor deze formule eigenlijk staat, en hoe belangrijk zijn interpretatie nog steeds is voor het huidige fysica onderzoek.

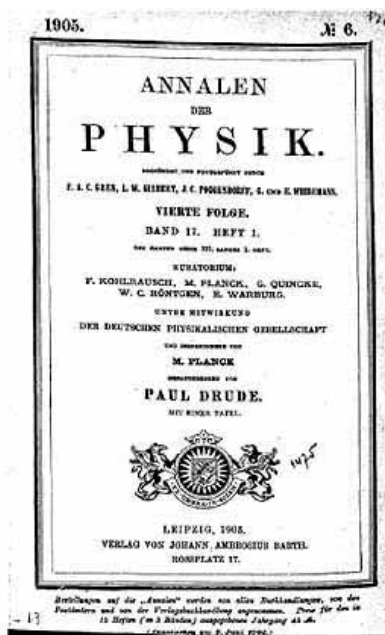
Het was in 1905, het annus mirabilis, dat Einstein het artikel “Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?” publiceerde in *Annalen der Physik* (figuur 1). In dit artikel vertrekt Einstein van zijn speciale relativiteitstheorie, een theorie die afstapt van de relativiteit van Galileo, en een constante lichtsnelheid veronderstelt in elk referentiestelsel. Als gevolg van deze nieuwe theorie moet gelden dat voorwerpen in rust voldoen aan de formule $E=mc^2$. Of, voluit geschreven, de energie van een object is gelijk aan zijn massa vermenigvuldigd met het kwadraat van de lichtsnelheid. Maar Einsteins formule betekent meer. Ze vertelt ons zeer concreet dat energie en massa als het ware gelijk zijn, of zoals Einstein zelf verklaart, energie en massa zijn beiden manifestaties van hetzelfde ding, ze zijn equivalent...

Is het dan mogelijk massa in energie om te zetten, of omgekeerd? Lijkt een bizarre gedachte, niet? Je voetbal die spontaan in een gigantische bron licht verandert. Of omgekeerd, het licht uit je bureaulamp dat plots massa krijgt. Toch blijken deze omzettingen zich inderdaad voor te doen op (sub-)atomair niveau. Met een aantal frappante voorbeelden willen we aantonen dat de invloed van deze formule echter niet beperkt is tot op microschaal, maar zich daadwerkelijk manifesteert in het dagelijks leven...

Laten we iets dieper ingaan op de formule. $E=mc^2$ betekent inderdaad dat met een bepaalde massa een hoeveelheid energie overeenstemt.

Wetende echter dat de factor c^2 , de lichtsnelheid in het kwadraat, een waarde heeft van $9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$ kan je je voorstellen hoe een kleine hoeveelheid massa overeenstemt met een gigantische hoeveelheid energie. Stel bijvoorbeeld dat de massa van je voetbal 300g bedraagt, en dat deze massa zich volledig omzet naar energie. Wel, na een korte berekening volgt dat zijn overeenstemmende energie ($8.3 \times 10^9 \text{ kWh}$) voldoende is om België iets meer dan een maand van elektriciteit te voorzien!

In de kernfysica bestaan twee processen waarbij concreet massa in energie wordt omgezet: kernfusie en kernsplijting (of kernfusie). Kernfusie is wellicht het meest gekend als motor voor de zon, terwijl kernsplijting bijvoorbeeld een kerncentrale werkende houdt en ons elektriciteit levert.

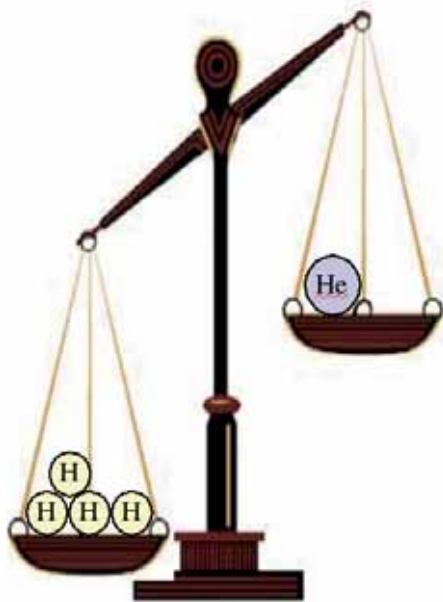


figuur 1

Wetenschappelijke magazine waarin Einstein zijn artikel over $E=mc^2$ in 1905 publiceerde.

Zonnestralen anders bekeken

Onze zon bestaat voor ~75 procent uit waterstof en ~25 procent uit helium. Het helium wordt voortdurend gevormd uit de fusie van vier waterstofkernen. Wanneer we de massa van vier waterstofkernen vergelijken met de massa van de resulterende heliumkern, merken we dat een deel van de oorspronkelijke massa is verdwenen: ze werd omgezet naar energie onder de vorm van elektromagnetische lichtgolven (*figuur 2*). Zonnestralen en -warmte zijn dus een rechtstreeks resultaat van kernfusie. Dankzij deze manifestatie van $E=mc^2$ werd leven op aarde mogelijk!



figuur 2

Vier waterstof-atomen (H) wegen meer dan één heliumatoom (He).

Splijtende kernen leveren elektriciteit

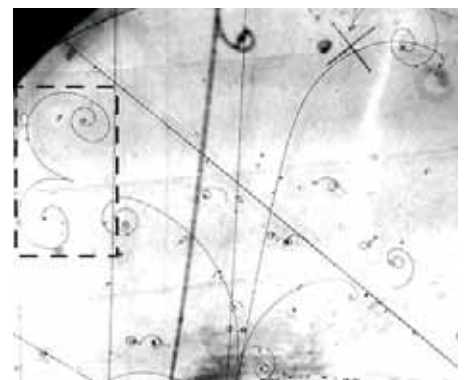
Nooit afgevraagd hoe een kerncentrale werkt? Kernsplijting is het antwoord. We vertelden al dat de fusie van lichte kernen zoals waterstof energie oplevert. Wel, nu blijkt ook de splitsing van zeer zware kernen energie te produceren. Zo is bijvoorbeeld de massa van een zware uranium- of plutoniumkern groter dan de massa van zijn vervalproducten. Opnieuw is dit massaverschil omgezet in een gigantische hoeveelheid energie. In het geval van een kerncentrale wordt deze energie gebruikt om water op te warmen. De zo geproduceerde stoom laat turbines draaien, die op hun beurt elektriciteit genereren.

Uranium en plutonium zijn radioactief, en zullen bijgevolg traag, maar spontaan vervallen. Deze vervalproducten zullen op hun beurt nieuwe vervallen stimuleren: er ontstaat een kettingreactie, die de centrale werkende houdt.

Als aanvulling bij de nucleaire centrale moeten we helaas de atoombom vermelden. Deze toepassing baseert zich ook op kernsplijting, maar de kettingreactie verloopt nu zo snel dat een gigantische bron van energie op zeer korte tijd vrijkomt: de bom explodeert... Einstein heeft lang de mogelijkheid van een atoombom ontkend, en nooit meegewerkt aan de ontwikkeling ervan. Zijn enige bijdrage was een brief aan VS president Roosevelt als aanmoediging voor het maken van de bom, uit angst dat de Nazi's de technologie als eerste zouden vergaren.

Omzetting van energie naar massa

Indien de equivalentie van massa en energie juist is, moeten er ook processen bestaan waarbij materie uit energie wordt geproduceerd. Als voorbeeld beschouwen we (*figuur 3*), die een foto van een bellenvat toont genomen in de late jaren '60. Alle passerende, geladen deeltjes zoals elektronen en protonen laten een spoor van kleine belletjes na. Om een schatting te maken van de lading en impuls (massa x snelheid) van een deeltje, wordt het bellenvat in een magnetisch veld geplaatst. Elektrisch positief geladen deeltjes vliegen in wijzerzin, negatief geladen deeltjes in tegenwijzerzin. Op de foto zien we duidelijk twee sporen. Beiden hebben dezelfde kromming, maar het ene spoor is in wijzerzin, het andere in tegenwijzerzin. "Uit het niets" worden dus twee deeltjes gevormd met identieke massa en snelheid, maar tegengestelde elektrische lading...



figuur 3

Vier waterstof-atomen (H) wegen meer dan één heliumatoom (He).

Antimaterie

De foto in (figuur 3) toont de productie van een elektron-positron paar uit elektromagnetische straling (energie). Het positron is wat men noemt het antideeltje van het elektron. Het heeft dezelfde massa, maar al zijn kwantumgetallen, waarvan de elektrische lading er een is, zijn tegengesteld. Elk materiedeeltje heeft zijn antibroertje. Een van de grote mysteries van de hedendaagse fysica is dan ook de vraag waar al deze antimaterie heen is. Overal waar we kijken in het heelal observeren we materie zoals we die op aarde kennen, terwijl bij de oerknal ("big-bang") beiden nochtans in gelijke mate werden geproduceerd...

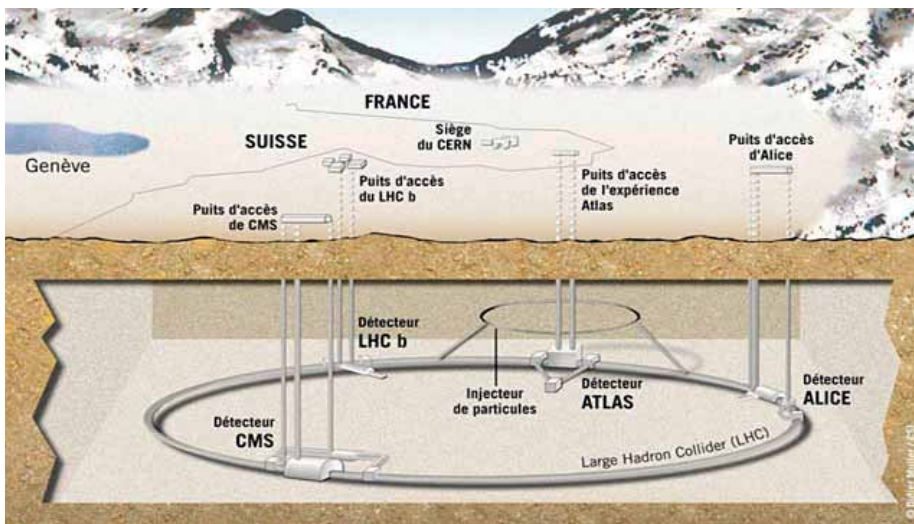
Een van de grote doelstellingen voor nieuwe experimenten is het detecteren van het Brout-Englert-Higgs deeltje, dat moet verklaren waarom materie massa heeft...

Conclusie

Aan de hand van enkele voorbeelden hebben we de betekenis en het belang van $E=mc^2$ geïllustreerd. Verder werd duidelijk dat veel hedendaags onderzoek zich nog steeds baseert op manifestaties van deze bekende formule.

Nieuwe materie maken met een deeltjesversneller

We kunnen Einstein's formule ook schrijven als $m=E/c^2$. De factor c^2 zal er nu voor zorgen dat we voor de productie van een kleine massa gigantisch veel energie nodig hebben. Toch is dit mogelijk, en reeds verwezenlijkt met deeltjesversnellers. Aan het CERN bijvoorbeeld (Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire) zal men in de nabije toekomst protonen (waterstofkernen) versnellen in een 27km lange ondergrondse ring (*figuur 4*). In beide richtingen zullen de deeltjes ronde na ronde meer energie krijgen om dan frontaal met elkaar te botsen. Deze botsingen zullen zo energetisch zijn, dat de productie van zware, instabiele deeltjes mogelijk wordt. Het W-boson bijvoorbeeld, een deeltje ongeveer 85 maal zwaarder dan een proton, werd op deze manier ontdekt. Het is dit deeltje dat verantwoordelijk is voor het radioactieve verval ("zwakke kernkracht").

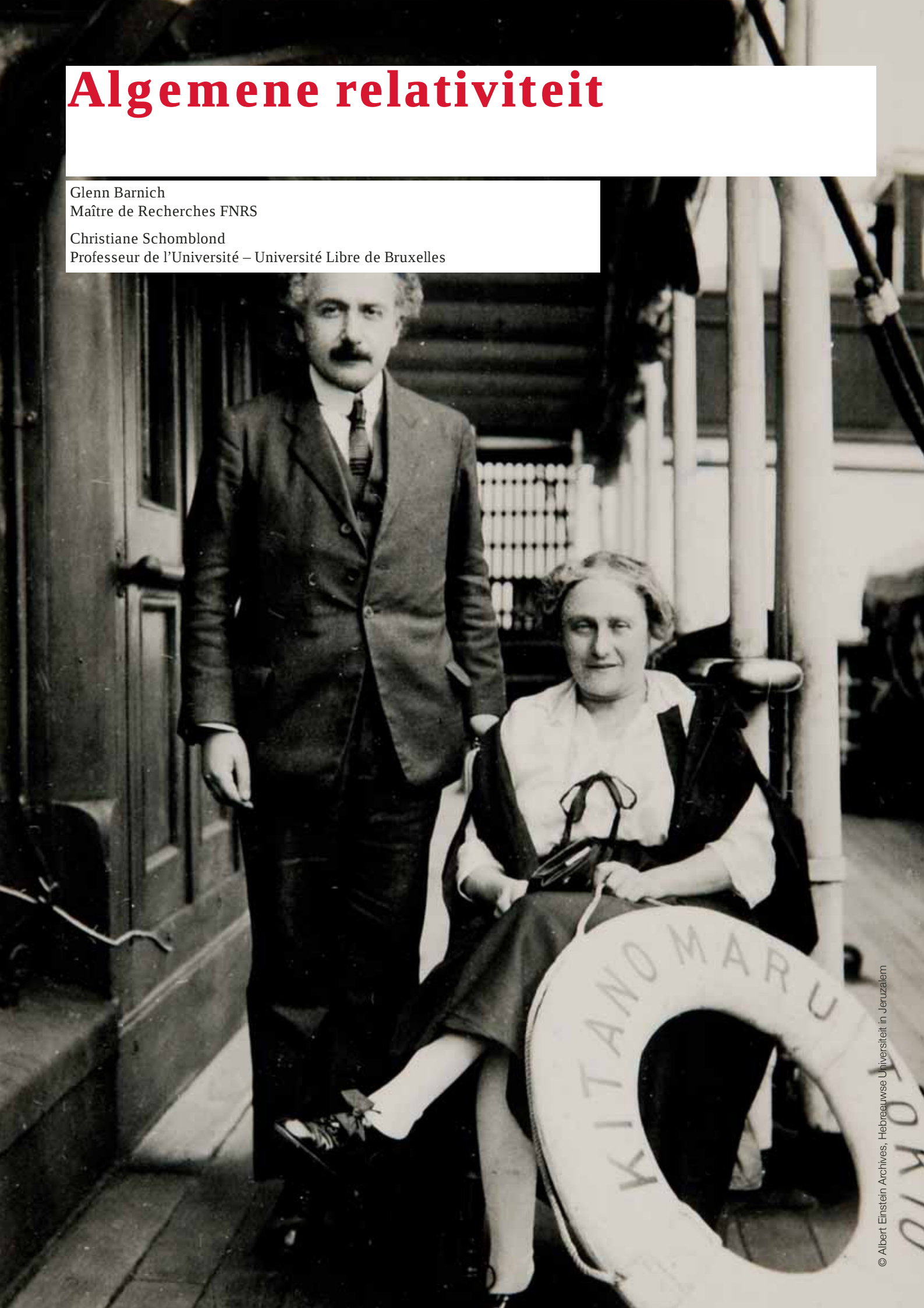


figuur 4
Nieuwe ondergrondse LHC-versneller in opbouw aan het CERN (Genève), met schematisch de vier experimenten aangeduid.

Algemene relativiteit

Glenn Barnich
Maître de Recherches FNRS

Christiane Schomblond
Professeur de l'Université – Université Libre de Bruxelles



De zwaartekracht (gravitatiekracht)

Op atomaire schaal is de zwaartekracht de kleinste van de 4 fundamentele krachten, op de schaal van het heelal is het de dominerende kracht. De algemene relativiteit is de relativistische theorie van de zwaartekracht. Zij is het product van een enorme inzet van Einstein tussen de jaren 1907 en 1915 om de zwaartekracht in het relativistische heden te integreren.

Volgens Newton is de zwaartekracht tussen 2 massa's evenredig met het product van deze massa's en omgekeerd evenredig met het kwadraat van hun afstand. Deze kracht heeft een onmiddellijke actie en dat is in evidente tegenstelling met de specifieke relativiteit volgens welke geen enkel signaal zich vlugger kan voortplanten dan de lichtsnelheid.

Met als doel de theorie van het elektromagnetisme van **Maxwell** en de klassieke mechanica van **Newton** te verenigen ontwerpt Einstein in 1905 zijn speciale relativiteit en verandert daardoor onze gebruikelijke conceptie van ruimte en tijd.

Maar vanaf 1907 is hij gaan zoeken naar de relativistische theorie van de zwaartekracht. Zijn antwoord is een verdere revolutie in onze conceptie van ruimte en tijd.

Tegenover het vaste en absolute kader waarin alle verschijnselen plaats hebben, wordt nu de ruimte – tijd een dynamisch en globaal geheel, recipiënt en inhoud zijn innerlijk gebonden.

Relativiteitsprincipe

Het relativiteitsprincipe van Galileo stelt dat **de wetten van de mechanica** dezelfde moeten zijn voor alle waarnemers die zich verplaatsen met een eenparige rechtlijnige beweging.

Zoals Einstein het zelf stelt is de speciale relativiteit een antwoord op de vraag: *“Is het relativiteitsprincipe tegenstrijdig met de Maxwellvergelijkingen in het luchtledige?”* In feite bestaat de tegenstrijdigheid niet op voorwaarde dat tijd zijn absoluut karakter verliest en men de beschrijving zelf van de eenparige rechtlijnige beweging wijzigt.

Het postulaat van Einstein wordt nu dat **de wetten van de fysica** dezelfde zijn voor alle waarnemers in eenparige rechtlijnige beweging. Maar gezien nu de tijd ook afhangt van de beweging krijgt het gelijktijdigheidsprincipe in feite een andere betekenis en verschijnen in de nieuwe theorie een hele reeks nieuwe fysische verschijnselen zoals de uitzetting van de tijd, contractie van de lengte en de equivalentie tussen massa en energie, op merkwaardige wijze uitgedrukt in de formule $E=mc^2$.

Maar deze vorm van relativiteit blijft gesloten voor de zwaartekrachttheorie van Newton. Het is in feite Hermann Minkowski die de eerste stap zet naar de algemene relativiteit of in andere woorden naar de relativistische behandeling van de gravitationele interactie. Hij geeft de specifieke relativiteit zijn meetkunde en voert het concept “ruimte-tijd” in.

Zwaartekracht en versnelling zijn equivalent

Het basiselement waarop heel deze relativistische theorie van de zwaartekracht berust is het experimenteel feit dat in het zwaartekrachtsveld alle lichamen op dezelfde wijze vallen en dit is natuurlijk het gevolg dat de zwaartekrachtmassa (in de uitdrukking voor de zwaartekracht kracht) en de traagheid van een lichaam (in $F=ma$) dezelfde zijn.

Voor Einstein betekent dit dat er een equivalentie is tussen zwaartekracht en traagheid en zal zijn theorie steunen op de gedachte dat een waarnemer in vrije val in het zwaartekrachtsveld deze zwaartekracht niet ervaart.

Einstein komt tot een nieuw beginsel “In een referentiesysteem in vrije val moeten de wetten van de fysica deze zijn die de speciale relativiteit aan een inertiële waarnemer oplegt”.

De zwaartekracht kan daarna ingevoerd worden in de overgang van een inertiële waarnemer naar een waarnemer in versnelling.

Het equivalentieprincipe

In 1907 beseft Einstein dat een waarnemer in vrije val niet onderworpen is aan de zwaartekracht. Versnelling en zwaartekracht moeten dus op een bepaalde manier gelijkwaardig of equivalent zijn. Dit equivalentieprincipe vinden we reeds terug in de werken van Galileo en Newton en is de eerste stap naar een relativistische theorie van de zwaartekracht.

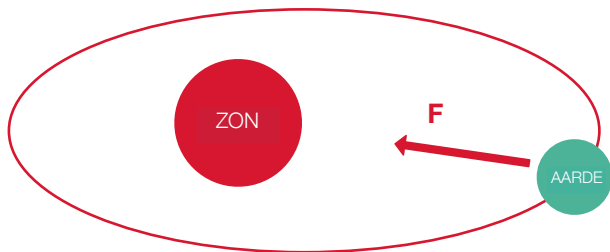
B. De motor drijft de raket aan. Voor een waarnemer in versnelling worden lichtstralen afgebogen.

A. Nemen we waarnemer in een raket in vrije val. Een projectiel (geel) zoals bijvoorbeeld een lichtdeeltje gaat rechtdoor.



C. We nemen hetzelfde effect waar als in een zwaartekrachtveld.

Zwaartekracht van Newton en van Einstein



De zwaartekracht volgens Newton (einde 17de eeuw)

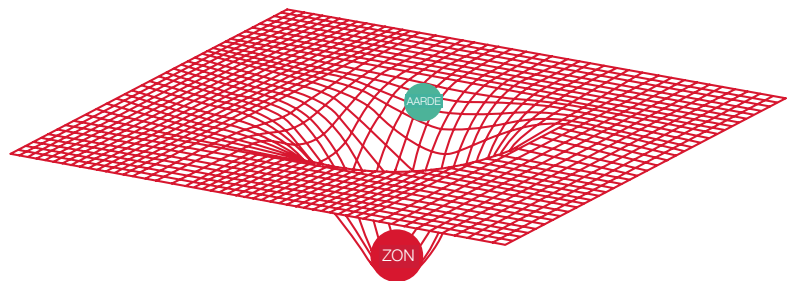
$$F = G \frac{Mm}{d^2}$$

De Aarde wordt aangetrokken door de zon. En omgekeerd.

De zwaartekracht volgens Einstein (begin 20ste eeuw)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8 \pi G T_{\mu\nu}$$

De Aarde is in vrije val in een ruimte-tijd, vervormd door de zon.



«De materie vertelt de ruimte hoe zij moet krommen, de ruimte vertelt de materie hoe zij moet bewegen.»
(J.A.Wheeler)

De kromming van de ruimte-tijd vervangt de zwaartekracht

Indien we in het relativiteitsprincipe de waarnemers in versnelling willen betrekken, dan is de meetkunde van de vlakke ruimte van **Minkowski** niet meer de goede en is de gekromde ruimte van **Rieman** aangewezen

In dit wiskundige kader heeft het equivalentieprincipe als gevolg dat we niet plaatselijk met de zwaartekracht moeten rekening houden. Het is echter onmogelijk van dit zwaartekrachtveld overal en gelijktijdig te verwaarlozen.

Einstein begrijpt dat de oorzaak van deze hindernis ligt in de kromming van de ruimte-tijd. We illustreren het voorgaande met een voorbeeld van gekromde meetkunde waarmee we vertrouwd zijn: de oppervlakte van de aarde. Willen we de oppervlakte van onze tuin meten dan gebruiken we de meetkunde van Euclides en de stelling van Pythagoras en vergeten we dat onze aarde rond is: op de schaal van onze tuin mogen we de kromming van de aarde verwaarlozen.

Dit is niet meer waar op een grotere schaal: het kortste traject tussen Seoul en Rio volgt een grote cirkel. Omgekeerd is op een vlakke landkaart van de aardbol deze weg een cirkelboog en lijkt langer dan het segment van de rechte tussen Seoul en Rio.

De gedachte dat het zwaartekrachtveld zich moet vereenzelvigen met de meetkunde van de ruimte-tijd is geleidelijk tot Einstein doorgedrongen.

In de ganse opbouw van de algemene relativiteit was de leidraad voor Einstein de vereiste dat de theorie, in een belangrijke mate, de resultaten van de zwaartekracht van Newton moest weergeven. Dit gezien het succes van deze theorie op het niveau van onze aarde en ons zonnestelsel.

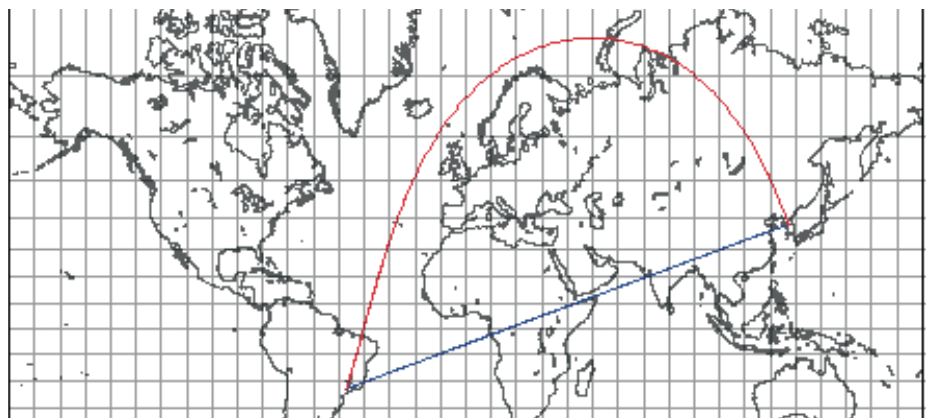
Vertrekkende van dit equivalentieprincipe in 1907 slaagt hij er tenslotte in om in 1915 de vergelijkingen te schrijven die het verband leggen tussen de meetkunde van de ruimte-tijd en de eigenschappen van de aanwezige materie en/of straling. Daardoor is in de algemene relativiteit de ruimte-tijd een dynamisch decor, een dynamische grootheid, geworden beheerd door de verdeling van materie en straling. Omgekeerd zal de kromming van de ruimte-tijd de regels van de beweging van de materie opleggen.

Dat is hetgeen de vergelijkingen van Einstein bevatten.

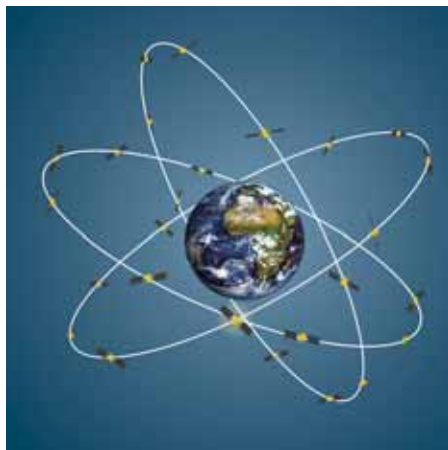
Van de uitzetting van de lengte naar het GPS systeem

Een van de gevolgen van deze nieuwe zwaartekrachttheorie is dat de tijd trager verloopt daar waar de zwaartekracht groter is. Om dit te verklaren heeft men de vergelijking van Einstein in feite niet nodig en volgt dit uit het equivalentieprincipe. Daarom heeft Einstein het ook reeds in 1907 kunnen voorspellen. De experimentele bevestiging kwam pas in de jaren zestig. Hoe dichter men zich bij het gravitatiecentrum bevindt, hoe langer de tijd is. Zou het effect wat groter zijn dan zou een bergbewoner vlugger verouderen dan zijn tweelingsbroer in de vallei.

Wel moet men hiermee rekening houden in de werking van de GPS. Deze gebruikt zeer nauwkeurige klokken die meereizen met satellieten rond de aarde. Houdt men er geen rekening mee dan zou men per dag een fout van 10km op de plaatsbepaling maken.



Wat is de kortste weg? Omdat de Aarde rond is, is de kortste weg tussen twee punten een grote cirkelboog. Ook in de ruimte-tijd is de kortste weg over het algemeen gebogen.



Galileo, het toekomstige Europese GPS-systeem, berust op het afstemmen van de signalen komende van de klokken in verschillende satellieten rond de aarde. Zonder rekening te houden met de algemene relativiteit zou dergelijk systeem niet werken. (© ESA)

Verandering van het perigeum van de planeten Afbuiging van de lichtstralen

De theorie van Newton verklaart de wetten van Kepler i.v.m. de beweging van de planeten. De eerste wet vertelt ons dat de baan van een planeet rond de zon een ellips is met de zon in een van de brandpunten. Bij nader onderzoek stellen de astrofysici echter vast dat de banen geen perfecte ellipsen zijn en dat de planeet wel enkele rondjes moet doen vooraleer terug bij zijn dichtste punt bij de zon (perigeum) te staan

De grootste bijdrage tot dit effect is zonder twijfel de aanwezigheid van de andere planeten maar er blijft een verschil bestaan dat de theorie van Newton niet kan verklaren. Voor Mercurius is dit een hoekverschil van 43 boogseconden in een eeuw, maar dit is nu juist de waarde die de vergelijkingen van Einstein ons geven.

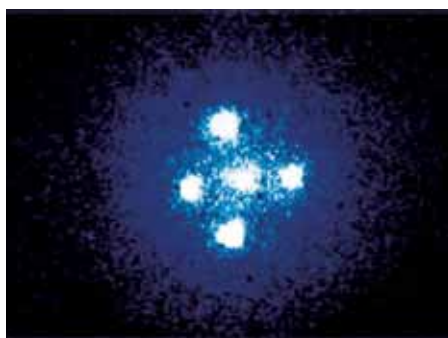
De verbetering kan men afleiden uit de berekening van de baan van een lichaam in het relativistische zwaartekrachtsveld. De eerste correcte oplossing van de vergelijkingen van Newton werd in 1916 bekomen door Karl Schwarzschild kort voor zijn dood in de loopgraven van de Eerste Wereldoorlog (1914-1918).

Een zelfde type berekening maar dit keer voor de lichtstralen in het zwaartekrachtsveld van de zon toont ons dat de afbuiging in feite 2 maal zo groot is dan deze die Newton bekwam.

Om dit experimenteel aan te tonen stelt Einstein voor om de afwijking van de positie van de lichtstralen te meten tijdens een zonsverduistering.

In 1919 organiseert de Engelse fysicus Eddington een expeditie naar twee eilanden in de Atlantische oceaan waar een zonsverduistering de nodige metingen zou toelaten. De voorspellingen van de algemene relativiteit waren in goede overeenstemming met de waarnemingen. Deze spectaculaire bevestiging geeft onmiddellijk aan Einstein een enorme bekendheid bij het grote publiek.

Het is diezelfde afbuiging die een verklaring geeft voor de effecten van gravitatielenzen gevormd door zeer grote massa's.



De afbuiging van lichtstralen door een concentratie van massa kan meervoudige afbeeldingen van één object opleveren. Eenzelfde object "verschijnt" hier vijf keer en vormt wat we een Einsteinkruis noemen. (© HST)

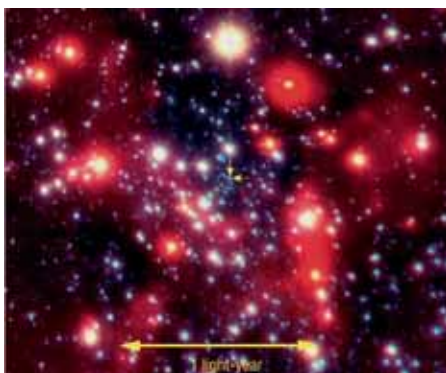
Zwaartekrachtgolven

De vergelijkingen van Einstein voorspellen ook het bestaan van storingen van de ruimte-tijd, die men zwaartekrachtgolven noemt. Deze golven planten zich voort met de lichtsnelheid, net zoals de elektromagnetische golven binnen de Maxwell theorie.

Net zoals een golf aan het wateroppervlak zal een gravitationele golf de ruimte-tijd “rimpelen” en afstandsmetingen verstoren. Men heeft zulke zwaartekrachtgolven nog niet kunnen waarnemen.

Daarvoor zou men enerzijds over zeer intense bronnen, zoals de botsing tussen 2 sterren, moeten beschikken en anderzijds over grote en gevoelige detectoren.

Zulke detectoren, die gebruik maken van laser-interferometers om afstanden met zeer grote nauwkeurigheid te meten, zijn vandaag in constructie (LIGO in VS, VIRGO in Europa). Er is er een, Lisa genaamd, die in 2011 in de ruimte zal worden gestuurd. Deze zou een nieuw venster op ons heelal moeten openen. Er bestaat wel een niet direct bewijs voor het bestaan



Het centrum van ons heelal, het melkwegstelsel, waargenomen via infra-rood. De twee pijlen tonen zwarte gaten. Hun massa zou gelijk zijn aan een miljoen keer de massa van de zon.

(© European Southern Observatory)

van zulke gravitationele golven en die steunt op de waarnemingen van een “binaire pulsar” ontdekt in 1974.

Het betreft hier twee sterren met zeer grote massa, die om elkaar wentelen en waarvan we van één, met regelmatige tussenpozen, signalen ontvangen, net zoals van een vuurtoren. Door het uitzenden van zwaartekrachtgolven gaat zulk tweevoudig systeem energie verliezen met als gevolg dat de twee sterren dichterbij elkaar komen en dan ook sneller gaan draaien. Dit fenomeen werd door Einstein op correcte wijze beschreven hetgeen een onrechtstreeks bewijs levert voor die zwaartekrachtgolven.

De Amerikaanse astrofysici Hulse en Taylor kregen voor deze ontdekking de Nobelprijs in 1993.

Zwarte gaten

Het eenvoudigste zwart gat is datgene beschreven door de oplossing van Schwarzschild. Het is een lichaam dat zou bekomen worden door de massa van onze zon samen te persen in een kubusvolume van enkele kilometers. In het heelal zou zulk zwart gat zich kunnen vormen door de ineenstorting van een voldoende zware ster, waarbij de interne druk van de materie niet meer kan opwegen tegen de zwaartekracht.

Volgens de theorie van Einstein zou dit proces aanleiding moeten geven tot een “singulier punt” en zou de kromming van de ruimte-tijd oneindig worden in het centrum van het zwart gat.

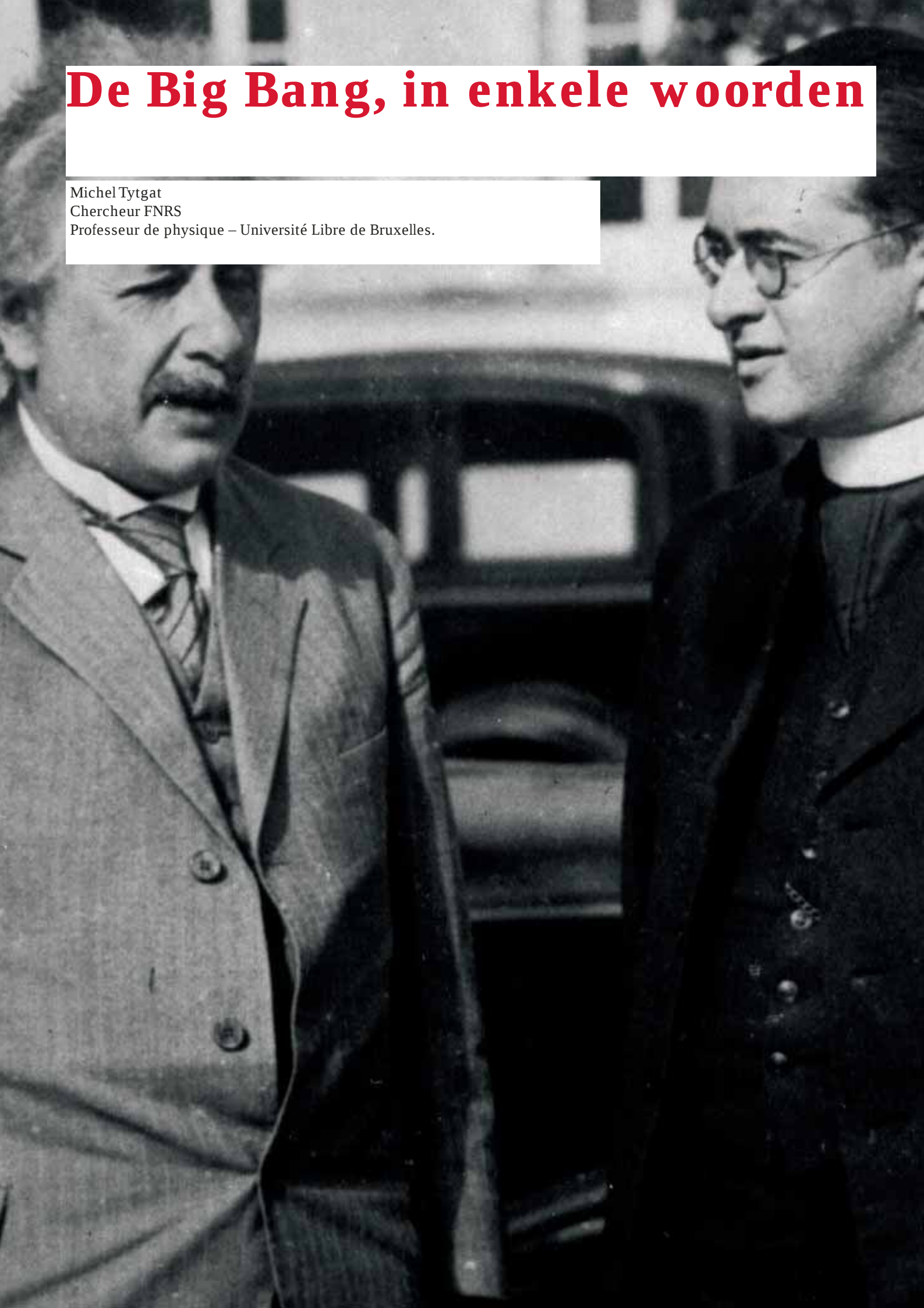
Het wordt dan ook onmogelijk om, in het strikte kader van de algemene relativiteit, te begrijpen wat er gebeurt. Alhoewel dit hinderlijk is,

wordt door dit singulier punt de fysica niet ongeldig, want dit punt ligt achter een horizon. Het betreft hier een oppervlak dat de ruimte-tijd in twee gebieden verdeelt. Geen enkel signaal dat intern wordt uitgezonden kan die horizon doorkruisen en eruit geraken. Daarom zal deze horizon voor een externe waarnemer voorkomen als de limiet van een volledig zwart lichaam. Zelfs indien er vandaag nog geen onweerlegbaar bewijs is voor het bestaan van die zwarte gaten werden er toch al een hele reeks astronomische objecten waargenomen die goede kandidaten zijn voor zwarte gaten. Er zijn vandaag waarnemingen die het bestaan van een zwart gat in het centrum van ons sterrenstelsel, de Melkweg, heel aannemelijk maken.

Stephen Hawking schrijft i.v.m. deze zwarte gaten: “Er was geen enkele experimentele aanduiding die onderzoekers een richtlijn gaven. Integendeel, de theorie van de zwarte gaten werd ontwikkeld lang vooraleer er maar een eerste aanwijzing bestond. Ik ken in de wetenschap geen enkel ander voorbeeld van het succes van zulke extreme extrapolatie uit een zuivere theoretische gedachte. Dit toont het merkwaardige vermogen en de diepgang van de theorie van Einstein”.

De Big Bang, in enkele woorden

Michel Tytgat
Chercheur FNRS
Professeur de physique – Université Libre de Bruxelles.



De theorie van Big Bang, wat is dat?

Het is de wetenschappelijke theorie volgens welke ons heelal uit een uiterst dichte en hete toestand zou ontstaan zijn en dit bijna 14 miljard jaar geleden.

“Ik pretendeer niet het universum te begrijpen – Het is een pak groter dan ik”.

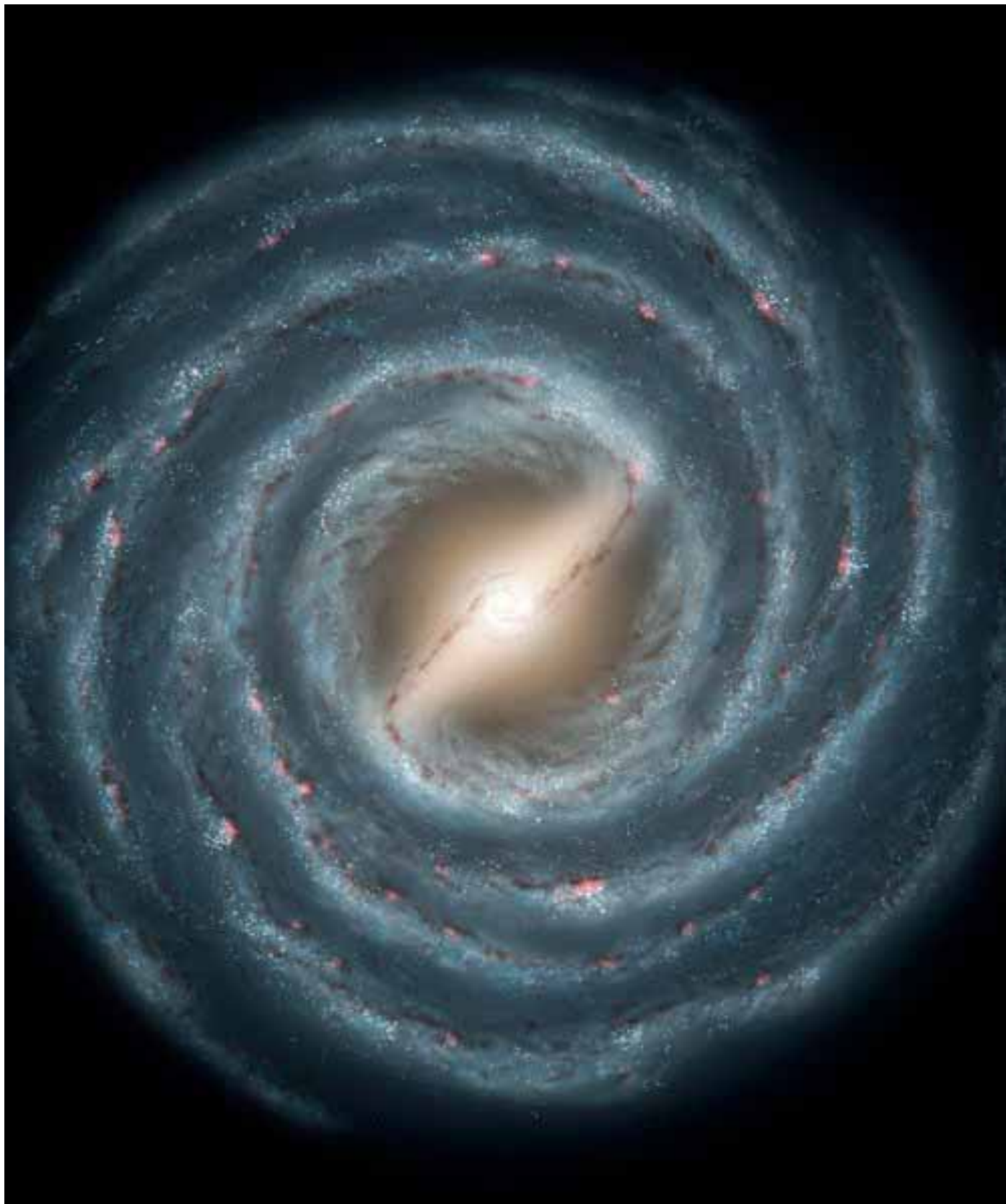
Albert Einstein

De kosmologie, het is de wetenschap van het heelal. In 1917 beeldde Albert Einstein zich een statisch heelal in, eeuwig en onveranderlijk. Vandaag, na talrijke ontdekkingen, geloven we dat het heelal evolueert, dat het een geschiedenis heeft en dat deze geschiedenis, waarvan de Big Bang het begin is, met behulp van de wetten van de natuurkunde kan worden verteld.

Big Bang is gebaseerd op het wegvlieden van melkwegstelsels, een fenomeen dat voor het eerst in de jaren '20 door de Amerikaan Edwin Hubble wordt ontdekt. Deze advocaat, die daarna sterrenkundige werd, heeft onze visie aanzienlijk uitgebreid. Hij toonde aan dat bepaalde nevelvlekken die in de telescopen van zijn voorgangers voorkwamen in feite melkwegstelsels waren, eilandjes van sterren analoog aan onze Melkweg, maar dan wel veel verder weg. Door de beweging van deze melkwegen te bestuderen, ontdekte hij vervolgens dat zij zich blijkbaar van elkaar verwijderden, alsof het heelal in de greep van een reusachtige maar stille explosie was.

Wie heeft de Big Bang uitgevonden?

Elke waarneming moet in een theoretisch kader geïnterpreteerd worden. Het waren de Rus Alexander Friedmann en de Belg Georges Lemaître die, door de weg voort te zetten die door Einstein voor het eerst was betreden, als eersten modellen van een heelal in uitbreiding beschouwden. Hoewel zij werden opgesteld in de jaren '20 blijven hun modellen zeer sterk verwant aan deze waarmee wij vandaag de dag ons heelal mee beschrijven. Men kan dus zeggen dat, gedeeltelijk minstens, de Big Bang Belgisch is!



Ziehier hoe volgens recent werk onze eigen melkwegstelsel eruit zou kunnen zien.

Fossiel licht



Einstein in het gezelschap van de Belg Georges Lemaitre, één van de grondleggers van de Big Bang theorie. Een kleine historische kanttekening, de Big Bang dankt zijn naam aan één van zijn tegenstanders, de Britse astronoom Fred Hoyle, die een eeuwig universum verkoos.

In de jaren '60 waren twee Amerikaanse ingenieurs, Arno Penzias en Robert Wilson, druk in de weer rond een nieuwe radioantenne bestemd voor astronomische waarnemingen. Hun apparaat nam een vreemd achtergrondgeluid waar, een elektromagnetische golf waarin heel het heelal scheen te baden. Zij ontdekten, bijna zonder het te beseffen, een echo van de verre Big Bang.

Om de oorsprong van deze straling te begrijpen, moeten wij tot het prille begin van het heelal teruggaan. Vanwege zijn enorme dichtheid ondergaat de materie veelvoudige botsingen en kan het slechts in de vorm van een gloeiend gas van elementaire deeltjes bestaan. Het licht wordt door zijn veelvoudige wisselwerkingen met de materie voortdurend ingevangen (voornamelijk door de **protonen** en de **elektronen**); het heelal is ondoorzichtig.

De expansie van het heelal leidt tot een vermindering van de temperatuur. Na 400.000 jaar, wanneer de temperatuur nog slechts enkele duizenden graden bedraagt, verenigen de **protonen** en de **elektronen** zich om waterstof te vormen. Snel wordt het heelal transparant en, bevrijd van de druk van de materie, begint het licht begint aan zijn lange reis.

Oorspronkelijk is deze straling zeer energetisch en draagt het de kenmerkende handtekening van het bad van deeltjes waarvan hij afkomstig is: het spectrum is dat van een **zwart lichaam** met een temperatuur van enkele duizenden graden. Wegens de expansie van het heelal, verliest het licht aan energie maar de handtekening verandert niet. Vandaag de dag nemen wij dit primordiale licht waar onder de vorm van een millimetrische elektromagnetische straling, waarvan het spectrum dat van een **zwart lichaam** is met een temperatuur van 3 K (Kelvin) of ongeveer min 270 graden C (Celcius). Dit fossiele licht, getuige van het rumoerige verleden van het heelal, vormt één van de hoekstenen van de Big Bang theorie.

De laatste nieuwtjes van de kosmos

Toen Einstein zich over het heelal heen boog, waren de waarnemingen waarover hij beschikte eerder beperkt; in 1917 bestonden de grote telescopen die Edwin Hubble enkele jaren later zou gebruiken nog niet. Maar Einstein was geen dommerik. Hij redeneerde zo: omdat er geen middelpunt is, geen bevoorrechte plaats, en dus alle standpunten gelijkwaardig zijn, moet het heelal de meeste uniform mogelijke vorm aannemen. Per uitbreiding moet het eveneens statisch zijn, hetzelfde op elk moment, uniform in tijd en ruimte.

Het probleem is dat de zwaartekracht een attractieve kracht is: onder zijn invloed is elke verdeling van materie dus verplicht om samen te klitten. Om dit effect te compenseren, voerde Einstein een afstotende kracht in, een soort “antizwaartekracht”. Hij noemt dit de kosmologische constante... en mist daardoor de ontdekking van de uitdijning van het heelal! Zijn grootste fout, zal hij ooit zeggen.

Als een feniks die uit zijn as weer opstaat, zal in de loop van de 20de eeuw de kosmologische constante regelmatig de nachten van kosmologen komen teisteren. Vandaag worden wij opnieuw geconfronteerd met dit geheimzinnige begrip. Moest het heelal enkel materie bevatten, zou de uitbreiding ervan moeten vertragen,

terwijl deze uitbreiding ogenschijnlijk aan het versnellen is. Een mogelijke verklaring zou te vinden zijn in het bestaan van een kosmologische constante. Men noemt het vandaag donkere energie, maar het blijft hetzelfde (de wetten van de marketing sparen de natuurkunde niet): het blijft een raadsel.

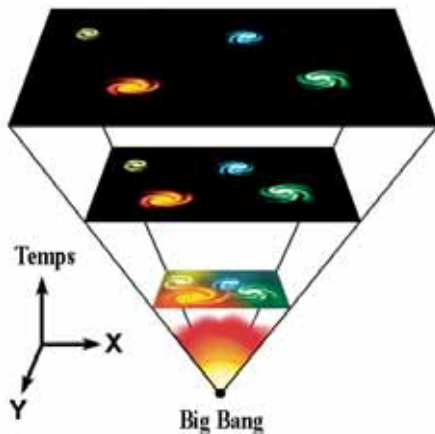
Alsof dat niet voldoende was, tonen de recentste waarnemingen een deprimerend aspect, tenminste voor sommigen. Niet alleen staan wij niet in het middelpunt van het heelal, maar bovendien bestaan wij niet uit de meest voorkomende vorm van materie in het heelal. Deze zwarte materie, zo genoemd omdat wij niets van haar afweten, behalve het feit dat zij massief is en dat zij onzichtbaar voor onze instrumenten is, is vijf keer overvloediger in het heelal dan de materie die de sterren, de planeten en alle dingen waarmee wij vertrouwd zijn vormt.



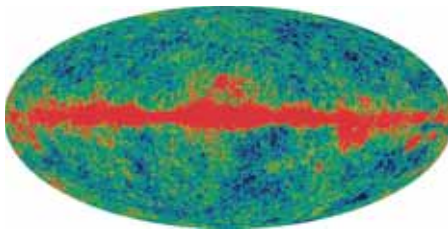
Het is onder andere dankzij de ontdekking van een bepaalde klasse van sterren door Henrietta Leavitt dat Edwin Hubble de afstand tussen de melkwegstelsels met een toen ongeziene nauwkeurigheid heeft kunnen bepalen.



Bij wijze van conclusie



Tweedimensionaal model van de uitbreiding van het heelal. De witte schijven stellen melkwegstelsels voor. Merk op dat de afstand tussen de melkwegstelsels vergroot, maar niet hun grootte.



Het universum heeft niet de vorm van een ei: dit beeld is enkel een projectie in het horizontale hemelvlak dat overeenstemt met ons melkwegstelsel. De vlekken stellen de beruchte variaties voor in de temperatuur of de energie van de oerfotonen. De studie hiervan onthult ons de samenstelling van het heelal toen het ongeveer 400.000 jaar oud was.

Een beroemde fysicus had de gewoonte om te zeggen dat “kosmologen vaak fout zijn, maar nooit onzeker”. Het is door onze directe omgeving te verkennen en door deze te analyseren dat wij de wetten van de natuurkunde ontdekken. Deze te extrapoleren naar het geheel van het heelal is een gedurfde maar redelijke methode, zolang wij geen reden hebben om erover te twijfelen. Zoals Einstein het met humor vermeldt, “Hoogstens nodigt het onderwerp uit tot een zekere bescheidenheid”.

Dankzij de komst van grote instrumenten, telescopen en satellieten, heeft de observationele kosmologie de laatste jaren enorme vooruitgang geboekt. De theoretische kosmologie staat niet stil: denk eraan dat ons inzicht in de wetten van de natuurkunde (in het bijzonder van de wetten van het oneindig kleine) ons toelaat om te overwegen wat zich tijdens de eerste fracties van een seconde van de geschiedenis van het heelal heeft kunnen voordoen. Sommige speculeren zelfs over wat zich op het moment van de Big Bang zelf heeft voorgedaan. Weliswaar blijven de geheimen van het heelal nog grotendeels ongekend, dat kan ons niet verhinderen om te denken dat dankzij de Big Bang theorie slechts een eeuw na het eerste werk van Einstein een tipje van de sluier is opgelicht.

Een andere Einstein

Jean Wallenborn

Professeur honoraire – Université Libre de Bruxelles



De wetenschappelijke wereld weet op welk punt Einstein ons wereldbeeld veranderd heeft; historici en sociologen hebben het ogenblik geduid waarop hij zich politiek en sociaal engageerde; zijn beeld is populair en zijn naam is thans synoniem voor genie. Maar weet men ook dat Einstein een experimentator was en een uitvinder en dat hij zich interesseerde voor onderwerpen die nutteloos lijken naast deze waarmee hij zijn reputatie vestigde?

Albert Einstein, geboren in een familie waar de vader trachtte de uitvindingen van zijn oom te commercialiseren, fabriceerde mechanische objecten vanaf zijn vroege schooljaren. Later, tijdens zijn studies in Zurich, ontwierp hij plannen met materiaal van het laboratorium van de ETH (Polytechnische School) om het bestaan van de **ether** te bewijzen, dat eigenaardig medium voor het transport van elektromagnetische golven, dat hij weldra naar de prullenbak zou verwijzen. Maar zijn project wordt tegengewerkt door zijn professoren die het aan de deur van het laboratorium zetten.

Wanneer hij bij het Patentbureau werkt interesseert hij zich voor de mogelijkheid om kleine potentiaalverschillen te versterken met behulp van in serie geplaatste condensatoren. Deze "Maschinen" (kleine machine) die hij zelf trachtte te construeren zal uiteindelijk door zijn vrienden, Conrad en Paul Habicht, gerealiseerd en verbe-

terd worden, en met succes in 1912 in Berlijn gepresenteerd worden.

Aan de andere kant voert hij in het Gymnasium van Bern experimenten uit op de hypothese van Ampère die zegt dat moleculaire stromen aan de basis liggen van het magnetisme. Hij zal dat probleem in 1914-1915 op veel uitvoerigere wijze hernemen in het kader van een echt experimenteel onderzoek samen met zijn assistent W.J. de Haas.

Tijdens datzelfde jaar 1915 is Einstein expert in een valideringsproces van een octrooi voor gyrokompassen die uit niet-magnetische kompassen bestaan, en waarvan de werking berust op de eigenschappen van de gyroscoop. Zijn op het domein verkregen bekwaamheid laat hem toe om van 1926 tot 1938 royalties te innen van de nederlandse firma Giro voor de verbeteringen die hij gesuggereerd heeft. We merken op dat

Het Einstein - de Haas effect

Ampère stelde de hypothese dat het magnetisme werd veroorzaakt door microscopisch kleine elektrische ladingen in beweging. Tijdens de magnetisatie van een ijzeren staaf wordt dus massa in beweging gezet en deze moet een kleine teruggang van de staaf veroorzaken. Om deze kleine terugloop te ontdekken hingen Einstein en de Haas een ijzeren cilinder op aan een soepele draad en ontdekten de rotatie wanneer de staaf plots gemagnetiseerd werd: de cilinder moet in de tegengestelde richting van de stroom draaien.

Einstein en de Haas toonden het effect kwalitatief aan, maar zij deden wat een experimentator nooit mag doen: zij lieten een aantal resultaten weg die kwantitatief niet overeenkwamen met de theorie... en dat was verkeerd omdat ze daarbij het bestaan van de **spin** negeerden die bij magnetische fenomenen een zeer belangrijke rol speelt.

het in 1915 is dat Einstein de laatste hand legt aan zijn algemene relativiteitstheorie.

Einstein zal nog lange tijd geïnteresseerd blijven in fysicaproblemen die ver liggen van degenen waarvoor hij gewoonlijk bekend is. Zo heeft Einstein in Berlijn een vriend die geneesheer is, dokter Mühsam, waarmee hij in 1923 een artikel schrijft over de experimentele bepaling van de doorlaatbaarheid van filters; maar hij interesseert zich ook voor theoretische problemen zoals de oorsprong van meanders in rivieren en de uitzending van licht door kathodestraalbuizen (positieve ionen die onder specifieke omstandigheden geproduceerd worden in zogenaamde **Crookes-buizen**).



Einstein toont zich op een verbazingwekkende manier een vruchtbare uitvinder die verschillende octrooien heeft genomen. In het begin van de jaren 1920 verneemt Einstein dat een hele familie gedood werd door gas dat uit een koelkast ontsnapte. Hij constateert dat het de bewegende delen van de compressor zijn die de toestellen kwetsbaar maken en zal dan samen met Leo Szilard¹, een jong en briljant fysicus, drie koeltechnologieën ontwerpen zonder mobiele delen. Eén van deze technologieën benut het water van de kraan, maar omdat de waterdruk teveel varieert wordt het project vlug verlaten. De firma AEG maakt een elektromagnetische pomp, maar die wordt eveneens niet benut door de ontdekking van het freon dat, in die tijd, onschadelijk leek; nochtans wordt het vandaag gebruikt in nucleaire reactors. Uiteindelijk wordt een koelkastoctrooi aangekocht door Electrolux, maar nooit gebruik. Recent toonde Andrew Delano aan dat de frigo volledig functioneel was en hij bouwde een prototype in het kader van zijn doc-

toraatsthesis aan het Technologisch Instituut van Georgia (VS).

En het is opnieuw de gevoeligheid van Einstein die aan de basis ligt van het octrooi dat in 1934 neergelegd werd samen met ingenieur Goldschmidt. Ze boden hulp aan een nogal hardhorige zangeres door een nieuw type hoorapparaat op punt te stellen.

Ter gelegenheid van zijn samenwerking met Goldschmidt schreef Einstein een klein gedicht dat aantoont welke zijn ingesteldheid was ten aanzien van praktische problemen:

*Ein biszchen Technik dann und wann
Auch Grübler amüsieren kann.*

*Drum kühnlich denk ich schon so
weit!:*

Wir legen noch ein Ei zu zweit².

Men kan het ook anders zeggen: voor Einstein bestaat er geen kleine of grote fysica. Alle problemen zijn fascinerend om op te lossen.

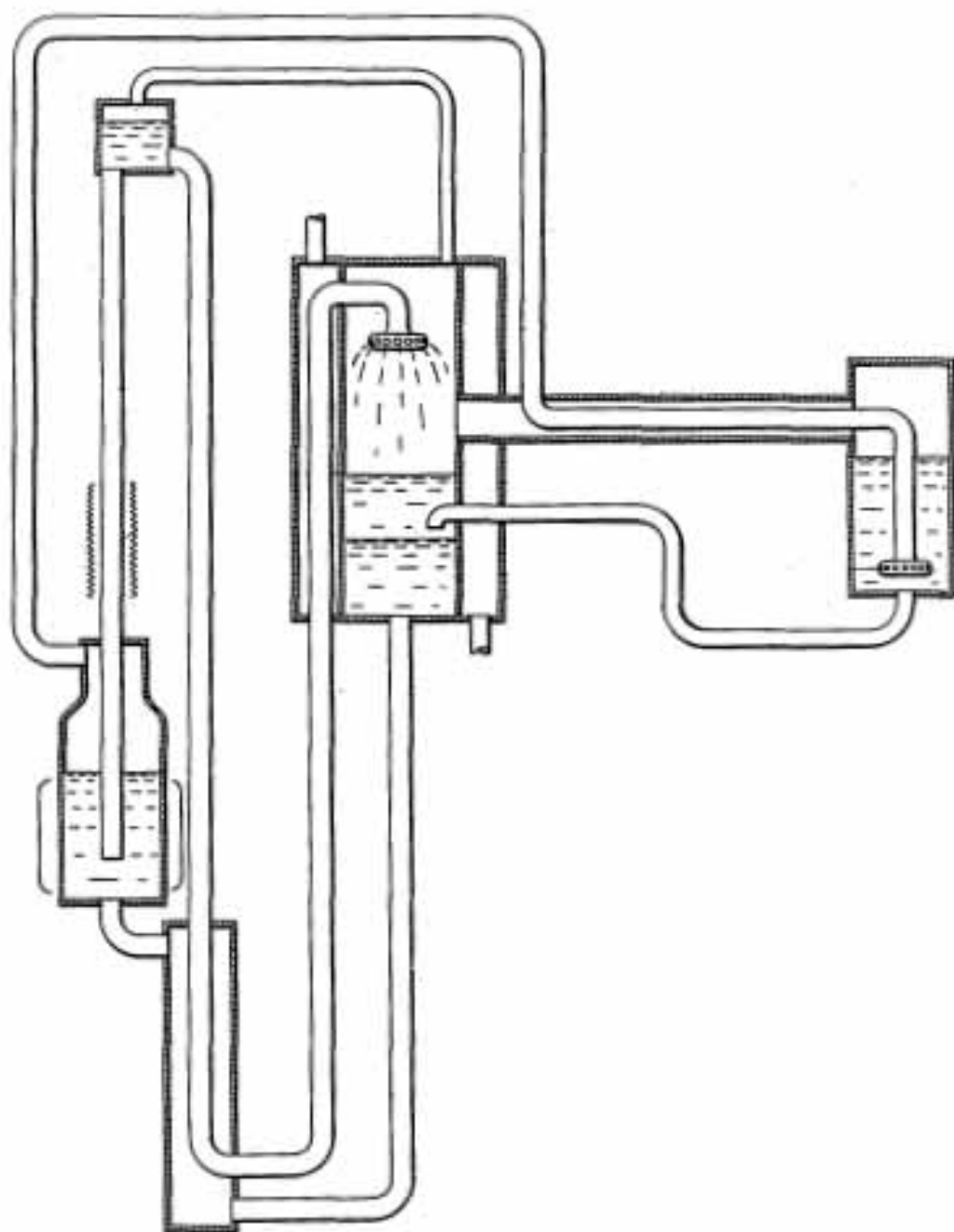
¹ Het is Leo Szilard die in 1939 Einstein onder druk zet om een brief te schrijven naar President Roosevelt om deze te overtuigen van de noodzaak om nucleaire wapens te ontwikkelen.

² *Af en toe een klein beetje techniek*

Kan ook de denker amuseren.

Daarom durf ik vandaag reeds uitdagend denken dat in de toekomst

We er samen iets goed van zullen maken.



Einstein Refrigerator

Patent number US1781541 -- November 11, 1930

*Albert Einstein
Leo Szilard*

De persoon Einstein

Elie Barnavi

Professor Geschiedenis – Universiteit van Tel-Aviv

Wetenschappelijk Raadgever van Tempora NV



De eenling

Het dromerige en verlegen kind, dat moeilijk praat en een traag reactievermogen heeft, heeft van jongs af aan een afkeer van autoriteit. Zijn ouders zijn typische Duitse joden, geïntegreerd en agnostisch. Hij is dan ook diepgelovig, tot hij zich op 12-jarige leeftijd bekeert tot de wetenschap, dat zijn nieuwe religie zal worden. In het gymnasium in München is hij een goede maar geen uitmuntende leerling want hij haat de ijzeren discipline die er heerst. Het gaat zelfs zover dat een van zijn leraars hem vraagt de school te verlaten, omdat alleen al zijn aanwezigheid storend is. Na zijn studie aan het Technologisch Instituut in Zürich, waar hij zijn eindexamen behaalt zonder bijzondere onderscheiding, wordt hij niet aanvaard door het academische establishment en hij komt uiteindelijk terecht in het Patentenbureau in Bern. Hij ontwikkelt zijn ideeën buiten de Universiteit, in gesprekken met vrienden die even onbekend zijn als hijzelf is en in de stilte van de bibliotheken.

Uiteindelijk krijgt hij erkenning en biedt men hem prestigieuze academische functies aan, zelfs in Duitsland dat hij als jongeman had verlaten en waar hij zelfs afstand had gedaan van de Duitse nationaliteit. Maar dit gebeurt via omwegen.

De uitzonderlijke begaafdheid van de man past dus in het kader van een bijzondere maatschappelijke context: dat van het Duitse jodendom, dat cultureel geïntegreerd is maar zich in de marge van de samenleving bevindt. Deze oncomfortabele situatie van het Duitse jodendom was gunstig voor de ontwikkeling van grote revolutionaire geesten. Marx, Freud, Einstein: dit trio van onze moderne samenleving groeide op in dit milieu.

De onderzoeker

Wanneer Einstein in 1905 de vier artikels die de basis vormen voor zijn werk één na één opstuurt naar de *Annalen der Physik*, is hij nog een onbekende ambtenaar bij het Patentenbureau in Bern. Nog geen decennium later wordt hij door de Duitse regering gevraagd om lid te worden van de prestigieuze Pruisische Academie van Wetenschappen. In tussentijd is hij een alom erkende en gerespecteerde geleerde geworden. Is zo'n wetenschappelijke loopbaan vandaag mogelijk? Waarschijnlijk niet. De eenzame onderzoeker die zijn ontdekkingen uitwerkt in de beslotenheid van zijn laboratorium zou opmerkelijk zijn in de hedendaagse wetenschappelijke wereld, die aangewezen is op enorme onderzoekkredieten en gemonialiseerde netwerken.

Een geleerde in de eeuw

Einstein de teruggetrokken held, Einstein het genie dat de menselijke limieten negeert, Einstein de zuivere theoreticus van het heelal – dit zijn stuk voor stuk mythes van onze fantasie. Eerst en vooral stond hij niet volledig alleen. Heel zijn leven lang heeft hij kunnen rekenen op goede vrienden, maar ook op de steun van invloedrijke personen, in de eerste plaats van Max Planck, een grote naam in de natuurkunde van die tijd en zijn grootste pleitbezorger. Vervolgens weigerde hij met een vurigheid die vandaag nog steeds verbazingwekkend is, de gevolgen van zijn eigen kwantumtheorie te aanvaarden. Hij hield van het absolute en zat gevangen in een wetenschappelijk determinisme, waarvan hij de grootste criticus was. Hij heeft dus heel zijn leven niet geaccepteerd dat God de dobbelstenen hanteerde. Tot slot bezit zijn zoektocht naar wetenschappelijke waarheid ook een poëtisch aspect, maar de man geeft blijk van praktisch inzicht en is gek op toegepaste wetenschappen. Meer nog, hij legde zich toe op het uitvinden van... de koelkast, hét gebruiksvoorwerp bij uitstek.

Net zoals Einsteins wetenschappelijke avontuur vandaag de dag onmogelijk zou zijn, heeft geen enkele geleerde na hem aanspraak kunnen maken op zijn intellectuele en morele positie. Hij stelde deze uitzonderlijke positie in dienst van zijn ideeën, hij maakte er een strijdinstrument van. Want Einstein was zijn leven lang een geëngageerde geleerde. Zijn wetenschappelijke werk en zijn politieke actie vormden twee aspecten van eenzelfde en diepgaand humanisme.

Zijn engagement is dan ook alleen van de buitenkant paradoxaal. Hij is een wereldburger en veracht het nationalisme uit alle macht en wordt dus zionist. Maar het blijft bij een cultureel zionisme: het kwam er voor hem op aan de joden een plek te geven waar zij hun talent kunnen ontwikkelen, beschermd tegen de haat en de vooroordelen van de antisemieten. Als overtuigd pacifist en hartstochtelijke Europeaan die vurig verlangt naar een supranationale 'organisatie van staten' die een einde maakt aan de oorlogen tussen Europese naties "zoals het Duitse Rijk dat heeft gedaan voor de oorlogen tussen

Beieren en Wurtemberg", schreef hij ook de beroemde brief aan Roosevelt. Het gevaar nam echter de verschrikkelijke vorm aan van het nazisme. Eén engagement ligt eigenlijk aan de basis van alle andere engagementen: de mensenrechten en de democratie. Als goed verzorgde Amerikaanse burger in Princeton waar hij zich thuis voelt als nooit en nergens anders, kant hij zich tegen de heksenjacht van MacCarthy en strijdt hij voor de burgerlijke gelijkheid van de Zwarten.

Het was ongetwijfeld niet meer dan normaal dat Ben Gourion de grootste levende jood de eer toekende de tweede president van Israël te worden. Het was echter even normaal dat deze beleefd weigerde omdat hij zijn vrijheid wou bewaren. Dit tot grote opluchting van de leiders van de joodse staat ("Wat doen we als hij ja zegt?"), die wisten dat deze volkomen oncontroleerbare man alleen maar voor eindeloos veel politieke problemen zou zorgen.

Einstein vandaag

Na zijn dood heeft een patholoog snel zijn hersenpan geopend in de hoop het geheim van zijn begaafdheid te vinden in zijn hersenkronkels. Op de cover van *Paris Match* spraken men over “de krachtigste hersenen van de eeuw”. Tijdens de millenniumwende bekroonde het Amerikaanse weekblad *Time* hem tot “person of the century”. Einstein was zeer zeker de intellectuele held van zijn tijd, het onverbeterlijke model van het absolute genie.

Waarom? Omdat hij de grenzen van de menselijke kennis heeft verlegd en onze kijk op het heelal heeft gewijzigd? Wellicht. Zijn wetenschappelijke avontuur was uitzonderlijk maar volstaat niet als verklaring voor zijn heldenstatus in de hedendaagse populaire cultuur. Hij wordt oneindig veel getekend, Warhol maakte zijn portret, hij wordt opgevoerd in ontelbare films en wordt ad nauseam gebruikt in de souvenir- en reclame-industrie. Hij is de maatstaf voor de menselijke intelligentie en tegelijkertijd de heimelijke droom van alle ouders in de hele wereld.

Natuurlijk zit zijn uiterlijk van verwarde professor er voor iets tussen; Einstein incarneert tot aan de karikatuur toe de zuivere denker in onze verbeeldingswereld. Hierbij komt zijn eenvoudige gedrag, zijn legendarische aanspreekbaarheid en vriendelijkheid, zijn viool en natuurlijk ook zijn politieke stellingname.

Maar er is meer dan dat en zijn ideologische vijanden wisten dit heel goed: zag hij er niet joods uit volgens de nazi's en was hij niet decadent en burgerlijk volgens de stalinisten en atheïst volgens de diepgelovigen? Einstein bood een rationele verklaring voor de onzekerheden in een van zijn stuk gebrachte 20ste eeuw, hij was de wetenschappelijke tegenhanger van de artistieke avant-garde van onze moderne samenleving. Weinigen begrijpen echt waarom en hoe hij onze kijk op de wereld drastisch heeft veranderd; maar velen voelen het zo aan. Hierdoor heeft hij niet alleen onze zekerheden heeft vernietigd, maar ook de wegen van onze vrijheid verkend. En zo was hij niet alleen de doodgraver van onze zekerheden, maar ook de grote onderzoeker van de wegen van onze vrijheid.

Lexicon

Absorptie: In golfmechanica de overdracht van energie naar materie als de golf zich door de materie verplaatst. Het kan gaan om een akoestische, elektromagnetische of mechanische golf.

Algemene relativiteitstheorie: (F. Tavernier) in 1916 gepubliceerd door A. Einstein, onderstelt deze gravitatie-theorie dat alle waarnemers equivalent zijn. Niet alleen de waarnemers in rust (zoals bij de speciale relativiteitstheorie), maar ook diegene die versnellen zijn equivalent.

Bohr Niels (1885-1962): (Britannica) Eén van de meest vooraanstaande wetenschappers van de 20ste eeuw en winner van de Nobelprijs voor Natuurkunde in 1922. Hij was de eerste die de kwantumtheorie toepaste op atomen. Zijn interpretatie van de betekenis van kwantumfysica werd een grondbeginsel van deze wetenschap.

Boyle Robert (1627-1691): (Britannica) Brits natuurfilosoof en theologisch schrijver. Zijn wetenschappelijk werk omvatte voornamelijk scheikunde, hydrostatica, fysica, geneeskunde, aardwetenschappen, natuurhistorie en alchemie. Zijn meest bekende ontdekking is de Wet van Boyle (1662), die uitdrukt dat bij een

constante temperatuur, de druk en het volume van een gas omgekeerd evenredig zijn: $P.V = \text{constante}$.

Buis van Crooke: Wanneer een elektrische stroom vloeit door een buis met weinig lucht, dan gloeit de lucht. Wanneer het vacuüm sterker wordt verminderd de gloed in de buis en verschijnt een fluorescerende vlek op het einde van de buis. De stralen hiervoor verantwoordelijk werden kathodestralen genoemd. Thomson ontdekte later dat het elektronen zijn.

Charles Jacques (1746-1823): (Britannica) Frans wiskundige, fysicus en uitvinder die als eerste, samen met Nicolas Robert, in 1783 met een waterstofballon opsteeg. Rond 1787 formuleert hij de (later zo door Gay-Lussac genoemde) Wet van Charles dat bij constante druk het volume van een gas evenredig is met de temperatuur: $V/T = \text{constante}$ voor een ideaal gas.

Cluster: Groep van enkele tientallen tot vele duizenden sterrenstelsels. Een van de bekendste clusters is de Virgo-groep. Tot het randgebied hiervan behoort de Lokale Groep met onze Melkweg.

De Broglie Louis-Victor (1892-1987): (Wikipedia) Louis-Victor de

Broglie werd geboren in Dieppe in Normandië. Voor zijn ontdekking van het golfgedrag van het elektron (dualiteit tussen golf- en deeltjesgedrag) en de daaruit resulterende theorie van materiegolven kreeg hij in 1929 de Nobelprijs voor de Natuurkunde.

Determinisme: (van Dale) Noodwendigheidsleer, leer volgens welke onze wilsbepalingen en handelingen geheel door voorafgaandelijke en uiterlijke omstandigheden bepaald worden, die dus de vrijheid van de wil ontkent.

(Dictionary.com) De filosofische doctrine dat elke toestand der dingen, met inbegrip van elke menselijke handeling, gebeurtenis en beslissing, het onontkoombare gevolg is van een voorgaande toestand der dingen.

Donkere materie: (Wikipedia) Materie in het heelal die niet zichtbaar is met optische middelen en ook niet detecteerbaar via de elektromagnetische straling die ons op aarde bereikt. Ze zou meer dan 80% van alle materie omvatten.

Draadloze telegrafie: Deze telegrafie waarbij de ether de metalen geleider vervangt als drager voor het signaal ontwikkelt zich vanaf 1890, datum waarop de Franse fysicus

Edouard Branly (1844-1940) er in slaagt een signaal over te dragen over een afstand van 25 meter. In 1894, doet de Brit Sir Oliver Lodge datzelfde over een afstand van 100 meter en vervolgens over 800 meter. Het jaar daarop vestigt de Italiaan Guglielmo Marconi (1874-1937) een nieuw record: 2,4 km! In 1896 bereikt men 12 km en in 1897 15 km. In 1899 zendt men over het Kanaal (46 km) en in 1901 overbrugt Marconi de Atlantische Oceaan over 3400 km. (Die laatste prestatie betekent dat de signalen de kromming van de aarde kunnen volgen, wat in die tijd door veel wetenschappers voor onmogelijk gehouden werd.)

Elektrisch veld: Begrip ingevoerd door de Britse natuurkundige Michael Faraday. Het is een krachtveld dat zich oneindig ver uitstrekt in alle richtingen vanaf een geladen object. Een lading oefent via dat veld aldus kracht uit op andere ladingen.

Elektromagnetische golf: Een trillend elektrisch veld plant zich voort als een golf; daarbij hoort steeds een trillend magnetisch veld; men spreekt daarom over een elektromagnetische golf. Licht is een voorbeeld van een dergelijke elektromagnetische golf; andere voorbeelden zijn radiogolven, microgolven, gammastralen, enz.

Elektron: (*scienceworld.wolfram.com*) Een negatief geladen elementair deeltje dat zich meestal bevindt in kwantummechanische banen rond neutrale atomen. Het antideeltje (d.w.z. met tegengestelde lading) is het positron.

ERB: acroniem voor Eenparige Rechthoekige Beweging. Het is een beweging langs een rechte lijn, altijd in dezelfde richting en met constante snelheid.

Ether: oneindig dun en onbeweeglijk fluïdum waarvan men dacht dat het de hele ruimte vulde. Dit liet de voortbeweging van elektromagnetische golven toe waarvan ether het dragend "weefsel" was. Het bestaan ervan en de onbeweeglijkheid waren eveneens het referentiestelsel om absolute snelheden te definiëren.

Exoplaneten: planeten die rond andere sterren dan onze zon draaien.

Foto-elektrisch effect: (*Science-world*) Proces waarbij elektronen vrij komen uit een metaal dat wordt gebombardeerd door fotonen. Een verklaring voor dit fenomeen was een van de eerste successen van de kwantummechanica.

Frequentie (en kleur): (*Frank*) Het aantal maal per tijdseenheid dat een regelmatig verschijnsel zich voordoet. Indien het gaat om een golf (licht bvb.) dan is het het aantal golven per tijdseenheid dat voorbij een vast punt uitkomt (uitgedrukt in 1/s of Hertz). Zichtbaar licht heeft een frequentie van $4 \cdot 10^{14}$ Hz (rood) tot $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz (blauwwit).

Gay-Lussac Louis (1778-1850): (*Wikipedia*) Frans scheikundige en fysicus, bekend voor zijn studie van de eigenschappen van gassen. Hij ontdekt begin 19e eeuw de volumetrische wetten van gassen (Wet van Gay-Lussac), die uitdrukken dat gassen zich volgens eenvoudige volumetrische verhoudingen mengen.

Gestimuleerde emissie: (*Science-world*) Wanneer een foton invalt op een deeltje dat zich in een geëxciteerde toestand bevindt (d.w.z. dat het kan terugvallen naar een lagere energietoestand) dan kan het de emissie bewerkstelligen van een extra foton met precies dezelfde polarisatie.

Golflengte: (*dictionary.com*) de afstand tussen een piek of dal van een golf (licht, geluid of een andere vorm van energie) en de volgende piek of dal.

Golftheorie vs. deeltjestheorie: (*Frank, Britannica*) In het debat aangaande de aard van licht, verdeelden de fysici zich in twee kampen. De enen dachten dat licht bestaat uit deeltjes (fotonen) en anderen die dachten dat licht een golfverschijnsel is. Dankzij het werk van J.C. Maxwell, die aantoonde dat licht uit elektromagnetische golven bestaat, kwam aan dat debat rond 1860 een einde.

Heisenberg Werner (1901-1976): (*Britannica, Wikipedia*) Voor zijn werk in de kwantummechanica ontving deze Duitse fysicus de Nobelprijs natuurkunde in 1932. Het bekende onzekerheidsprincipe van Heisenberg is van hem afkomstig. Daarnaast heeft hij belangrijke bijdragen geleverd aan de hydrodynamica van turbulentie, de atoomkern, ferromagnetisme, kosmische straling en elementaire deeltjes en was hij de ontwerper van de eerste naoorlogse kernreactor in Karlsruhe in Duitsland. Heisenberg mag gezien zijn prestaties op velerlei gebied wel een genie worden genoemd.

Hyaden: Is een open sterrenhoop (=groepering van enkele tientallen sterren die ontstaan zijn uit dezelfde gaswolk) in het sterrenbeeld Stier.

Inductie: Ontstaan van een elektrische stroom in een geleider wanneer deze in beweging is ten opzichte van een magnetisch veld.

Interferentie: als (licht)golven samenkomen in eenzelfde punt moeten ze opgeteld worden; men noemt dit het superpositieprincipe. Daarbij kan er versterking optreden dan wel

verzwakking; soms doven de beide golven elkaar zelfs volledig uit.

Kinetische theorie of kinetisch-moleculaire theorie (*Wikipedia*) probeert de macroscopische eigenschappen van gasen te verklaren aan de hand van hun compositie op moleculair niveau.

Kosmologische constante: (*Wikipedia* & *F. Tavernier*) De kosmologische constante is historisch een parameter die de afstotende kracht bepaalt die de ruimte zelf uitoefent op materie en aldus mede de uitdijing van het heelal aandrijft. Meer recent in de kwantummechanica (en gerelateerd met het voorgaande) bepaalt de kosmologische constante de energie-inhoud van vacuüm.

Kwantummechanica: (*Science-world* & *F. Taverne*) In 1900 opperde Max Planck, om het probleem van de ultraviolette catastrofe op te lossen, het idee dat licht bestaat uit deeltjes (fotonen) net zoals Newton meer dan 200 jaar eerder postuleerde, en dat bovendien die fotonen slechts bepaalde energieniveaus konden hebben. Er blijkt bovendien dat niet alleen golven een deeltjeskarakter hebben, maar ook dat (heel kleine) deeltjes een golfkarakter hebben.

Lengtecontractie: de Nederlandse fysicus Hendrick Antoon Lorentz had voor Einstein de idee van contractie in de bewegingsrichting voorgesteld. Hij dacht daarbij nochtans aan een effectieve verkorting door veranderingen tengevolge van een verandering van intermoleculaire krachten door de beweging.

Magnetisch veld: Begrip ingevoerd door de Engelse wetenschapper Michael Faraday. Het is de “onzichtbare” grootheid die elke magneet of elke elektrische stroom vergezelt. In

tegenstelling tot elektrische veldlijnen, zijn magnetische veldlijnen altijd gesloten (d.w.z. ze vormen lussen). Er bestaan dus geen magnetische monopolen (d.w.z. bij elke noordpool hoort een zuidpool).

Mariotte Edme (1620-1684): (*Britannica*) Frans fysicus en plantkundige. Hij ontdekte onafhankelijk van Boyle in 1676 dat $P \cdot V = \text{constante}$, een wet die in Frankrijk als de Wet van Mariotte bekend is.

Materiegolf: De Broglie stelde zich voor dat bij een bewegend elektron een golf hoort. Een dergelijke golf noemde hij een “materiegolf”.

Maxwell James Clerk (1831-1879): (*Britannica*) Schotse wiskundige en fysicus die vooral bekend is voor zijn studie van elektromagnetische (EM) golven (wetten van Maxwell). Hij leverde ook een belangrijke bijdrage in de kinetische theorie van gasen en maakte de eerste kleurenfoto (1861). (*Wikipedia*) In 1931 noemde Einstein zijn werk het “meest diepgaande en vruchtbare dat de natuurkunde heeft ervaren sinds Newton”.

Newton Isaac (1642-1727): Engelse wiskundige en fysicus die de wetten van de mechanica afleidde en deze van de zwaartekracht door zich te buigen over het idee van een absolute tijd en ruimte.

Orbitaal: (*Wikipedia*) Een orbitaal is een afgebakende zone binnen een atoom die 90% van de “elektronenwolk” van een elektron in het geïsoleerde atoom omvat. Het is het trefkansgebied van een elektron binnen de grenzen van het atoom.

Planck Max (1858-1947): (*Britannica*) Duits fysicus, ontvanger van de Nobelprijs voor natuurkunde in 1918, is best bekend als degene die de eer-

ste stappen in de kwantummechanica zette. Zijn werk leidde een nieuw tijdperk in voor de theoretische fysica en bracht een omwenteling teweeg in het begrip van atomaire en sub-atomaire processen.

Het principe van de speciale relativiteit: de wetten van de fysica zijn dezelfde in alle inertiale referentiestelsels.

Proef van Young: (*Britannica*) Experiment genoemd naar Thomas Young (1773-1829). Wanneer men licht vanuit een enkele bron laat schijnen door twee dunne dicht bij elkaar geplaatste spleten (een dubbelspleet) op een scherm, dan kan men interferentie zien op het scherm (banden van licht en donker). Interferentie is een eigenschap van golven, niet van deeltjes.

Proton: (*F. Tavernier*) Elementair deeltje met een massa die 1800 maal die van het elektron is en met een tegengestelde (positieve) lading. Protonen vormen (samen met eventuele neutronen) de kernen van atomen.

Radiospectrum: Deel van het elektromagnetische spectrum waarin lichtgolven een golflengte hebben groter dan een halve meter.

Radiosterrenstelsel: Sterrenstelsel dat voornamelijk licht uitstraalt in het radiospectrum

Ruimtetijd of tijdruimte: begrip ingevoerd in de natuurkunde door Einstein in zijn speciale relativiteitstheorie en volgens welke ruimte en tijd onafscheidbaar zijn. Ze vormen samen een vierdimensionale entiteit die men ruimtetijd noemt.

Rutherford Ernest (1871-1937): (*Wikipedia*) Nieuw-Zeelandse natuur- en scheikundige. Hij wordt ook wel de vader van de kernfysica genoemd.

Hij was pionier in de baantheorie van het atoom door de ontdekking van de verstrooiing van Rutherford.

Schrödinger Erwin (1887-1961): (*Wikipedia*) Oostenrijks natuurkundige die beroemd werd door zijn bijdragen aan de kwantummechanica en in het bijzonder de Schrödingervergelijking waar hij in 1933 de Nobelprijs in voor kreeg.

Schrödinger is ook bekend van de Schrödinger's kat. Dit is een gedachte-experiment uit 1935 over het begrip superpositie in de kwantummechanica.

Spectroscoop: licht is (bijna altijd) samengesteld uit meerdere kleuren. Een spectroscop is een toestel dat het licht ontbindt in zijn samenstellende kleuren.

Spectrum: (*dictionary.com*) De energieverdeling van de EM straling van een stralingsbron (bvb. de zon of een lamp), gerangschikt naar golflengte of frequentie.

Spin: hoeveelheid kinetisch, impuls- of draaimoment geassocieerd met een subatomair deeltje of atoomkern. Het is altijd een veelvoud van de constante van Planck gedeeld door 4π .

Statistische fysica: (*Wikipedia*) Statistische fysica gebruikt statistische methoden om fysische problemen op te lossen. Het vindt toepassing in elk gebied dat inherent stochastisch (=kans afhankelijk) is. Voorbeelden zijn kernreacties en deelgebieden van biologie, scheikunde, neurologie en zelfs sommige sociale wetenschappen zoals sociologie.

Spontane emissie: (*Wikipedia*) Proces waarbij een atoom of molecuul dat zich in een geëxciteerde toestand bevindt uit zichzelf terugvalt naar een

lagere energietoestand en de vrijgekomen energie uitzendt als een foton. De richting en fase van het foton zijn willekeurig.

Stochastisch proces: (*Wikipedia*) In de kansrekening is een stochastisch proces een kansafhankelijke functie. In de meest gangbare toepassingen is het domein waarover de functie is gedefinieerd de tijd (een tijdserie) of een gebied in de ruimte (een kansafhankelijk veld). Diffusie (bvb. inkt in water) is een stochastisch proces.

Thomson Joseph John (1856-1940): (*Britannica*) Engels natuurkundige die het elektron ontdekte. Zijn onderzoek legde de fundering voor belangrijke ontwikkelingen in onder meer elektriciteit, elektronica en scheikunde. In 1906 kreeg hij de Nobelprijs voor zijn werk op de geleiding van elektriciteit door gassen.

Tijdsdilatatie: er bestaan evenveel tijden als er inertiaële stelsels zijn.

Ultraviolette catastrofe: (*Wikipedia, Britannica*) Uit de klassieke stralingstheorie van de 19de eeuw volgde de Wet van Rayleigh-Jeans die het spectrum van een zwart lichaam voorspelt. Voor hoge frequenties/korte golflengten voorspelt ze echter dat de uitgestraalde energie kwadratisch toeneemt met de frequentie, zodat de totaal uitgestraalde energie oneindig groot zou zijn. Daarom formuleerde Max Planck in 1900 de Stralingswet van Planck.

Wet van Hubble: (*Wikipedia*) Een wet in de sterrenkunde, die stelt dat melkwegstelsels zich van elkaar verwijderen met een snelheid die evenredig is met hun onderlinge afstand.

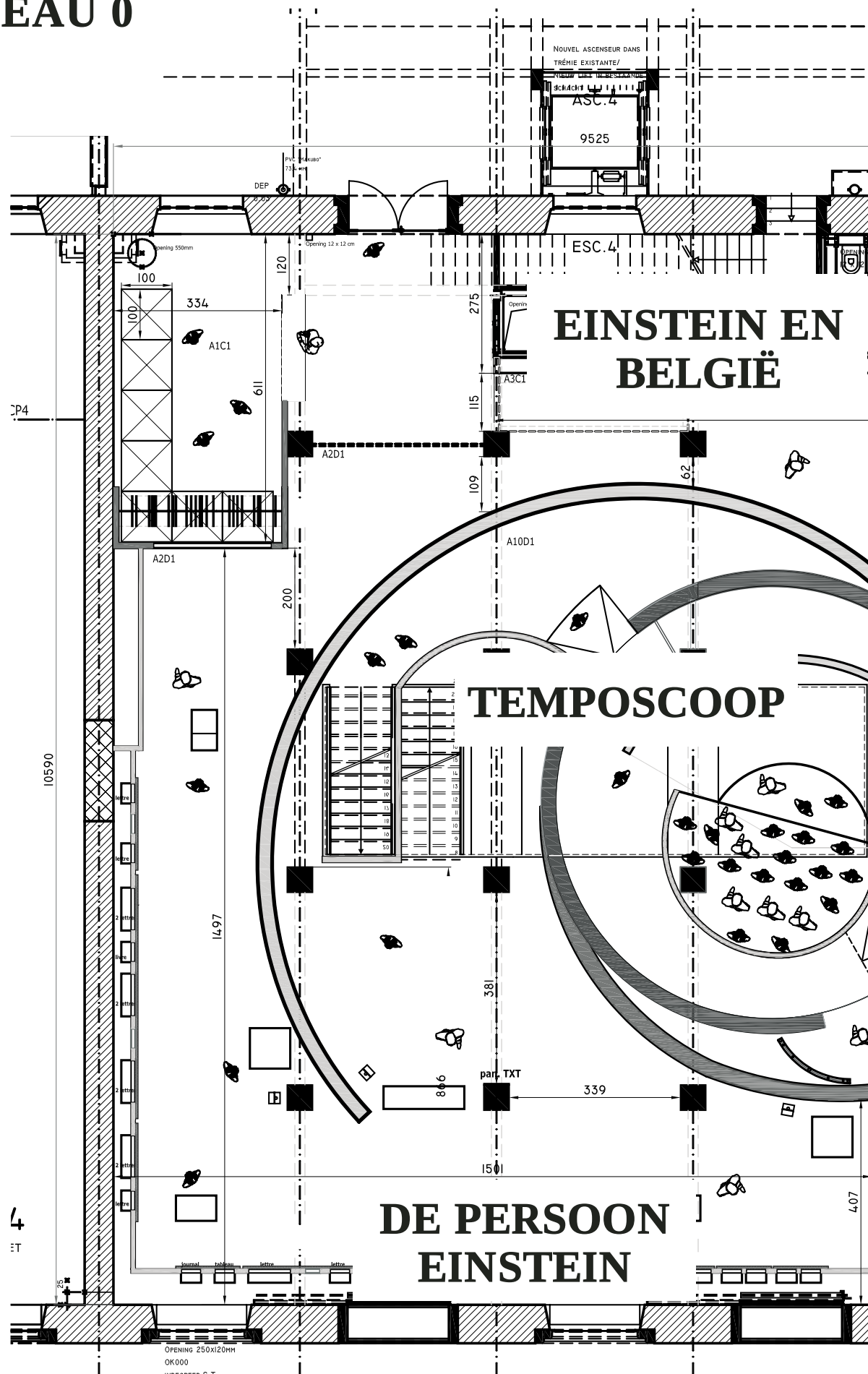
Zonsverduistering: Dit gebeurt wanneer de maan tussen de zon en de aarde komt te staan en haar scha-

duw werpt op de aarde. Afhankelijk van de afstand van de maan tot de zon en de plaats op aarde is de zonsverduistering gedeeltelijk of volledig.

Zwart lichaam: (*scienceworld.wolfram.com*) Een theoretisch lichaam dat alle inkomende elektromagnetische straling absorbeert. Als het koud is is het dus perfect zwart. De enige straling die het uitzendt is warmtestraling.

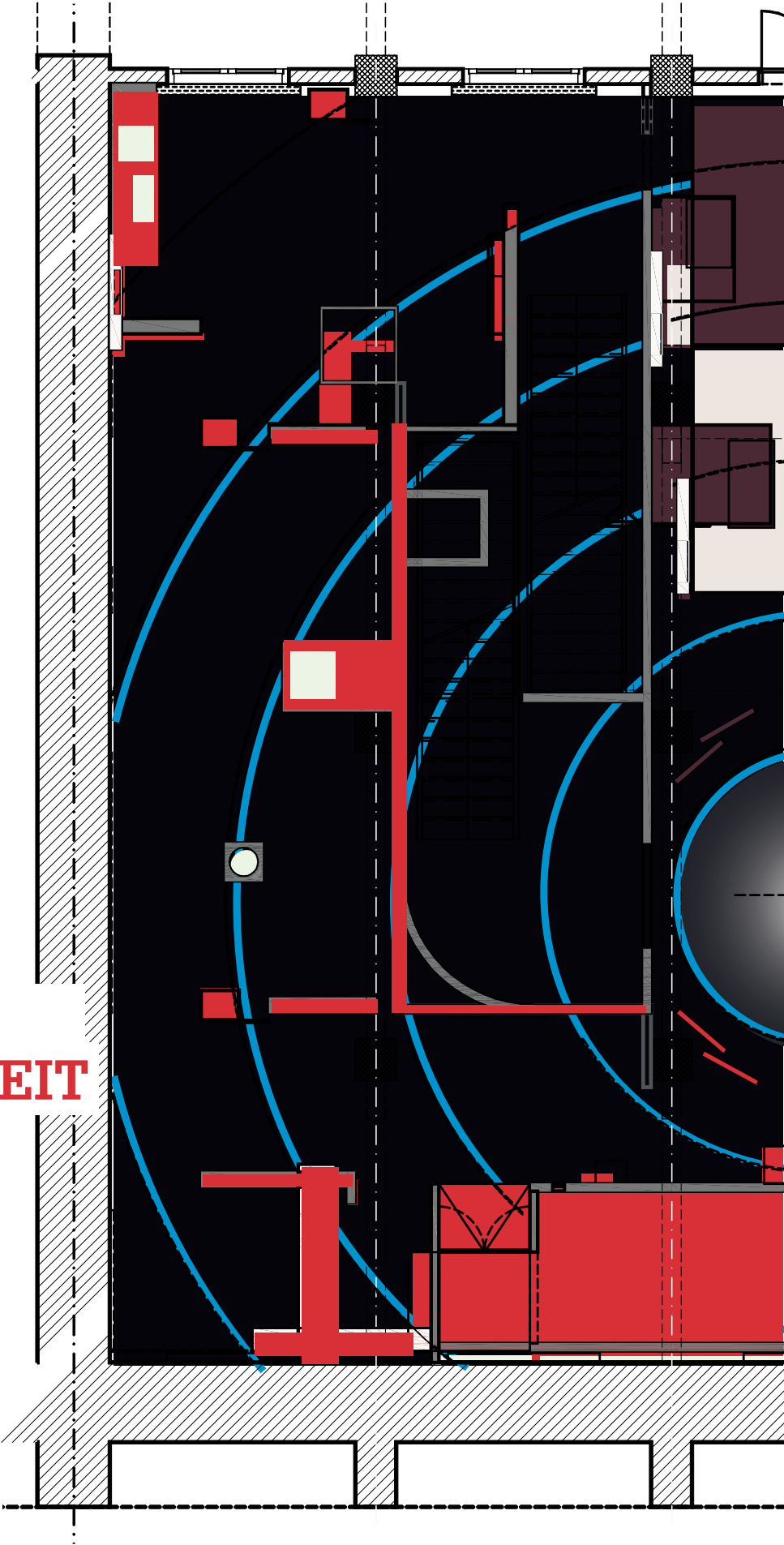
DE TENTOONSTELLING

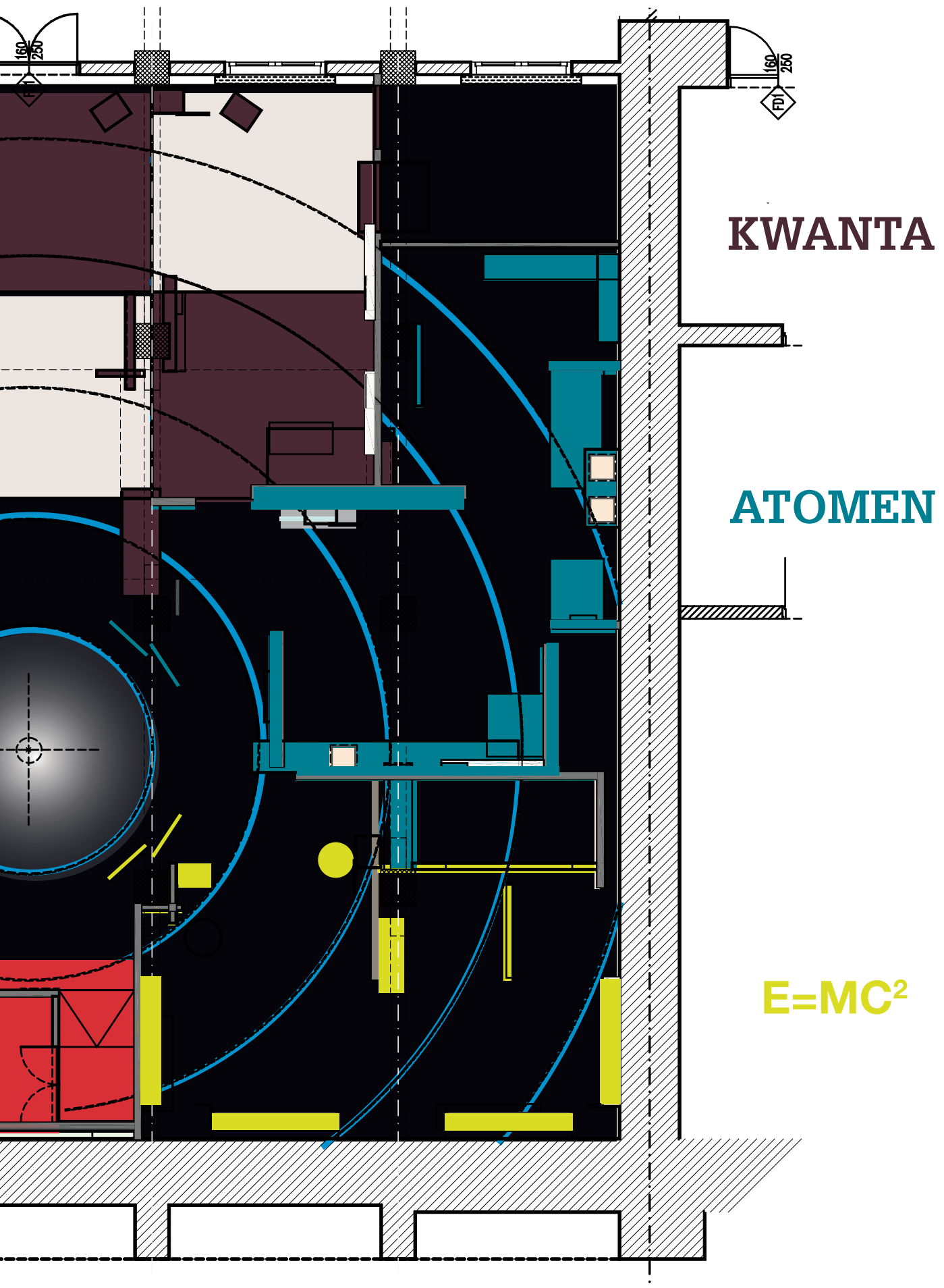
EXPO NIVEAU 0



EXPO NIVEAU -1

RELATIVITEIT



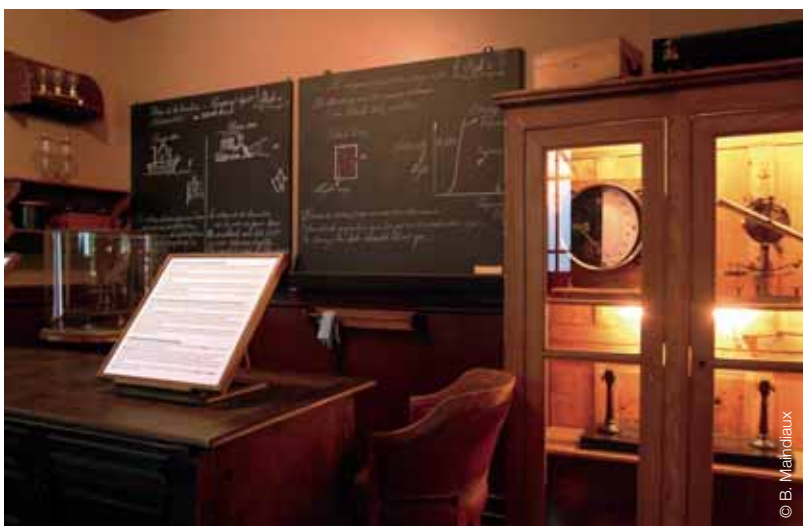




Einstein en België



Einstein en België



Het labo van de 19de eeuw

Het fresco van de fysica



De kwanta





De kwanta



$E=mc^2$



Veld-ionen-microscop

De vier artikels



De muonendetector





Het leven van Einstein



Het leven van Einstein



Einstein vandaag

Onder de Hoge Bescherming van Koning Albert II

De realisatie van de tentoonstelling Einstein, anders bekeken was onmogelijk geweest zonder de steun van publieke overheden, stichtingen en ondernemingen. Zij delen met de initiatiefnemers van de tentoonstelling de wens om de wetenschappen en de humanistische waarden waar Einstein voor opkwam in de schijnwerper te plaatsen.



Brussels Hoofdstedelijk Gewest

Charles Picqué
Minister-Voorzitter

Benoît Cerexhe
Minister belast met Wetenschappelijk Onderzoek

Guy Vanhengel
Minister van Externe Betrekkingen



Marie-Dominique Simonet
Ministre de l'Enseignement
supérieur
et de la Recherche scientifique



Bert Anciaux
Minister van Cultuur



Evelyne Huytebroeck
Ministre en charge du Tourisme
à la Commission communautaire française
(COCOF)

Françoise Dupuis
Ministre en charge de la Culture
à la Commission communautaire française
(COCOF)





met de steun van

Collection et Patrimoine – Museum van Europa – IBA – Celio – Tour & Taxis – Barco



