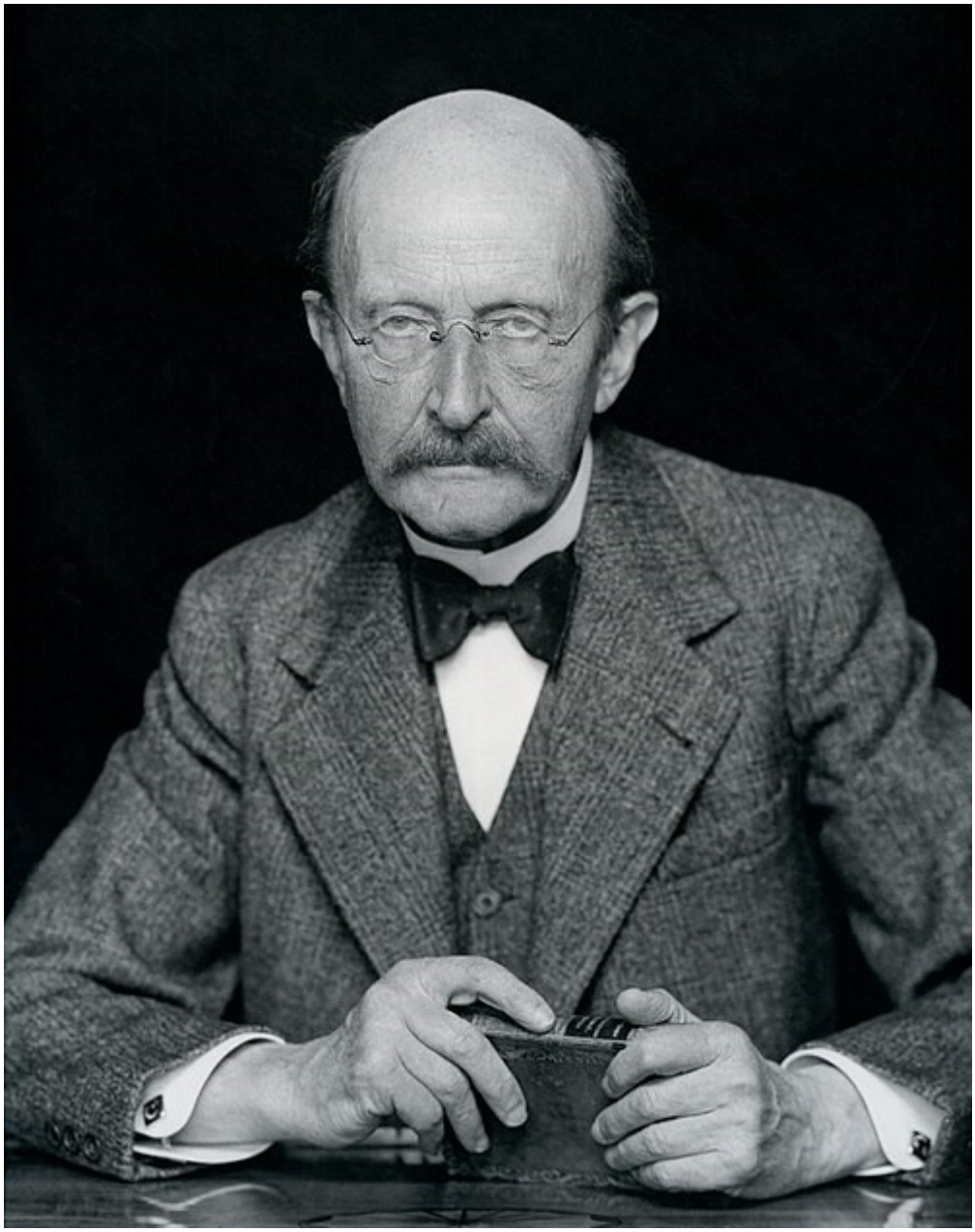
Quantumpioniers (2): Max Planck

In de serie ‘Quantumpioniers’ worden het leven en het werk van een aantal van de belangrijke natuurkundigen die hebben bijgedragen aan de ontwikkeling van de quantummechanica uitgelicht. In dit artikel lees je hoe Max Planck de atomaire theorie van Ludwig Boltzmann gebruikte om zwarte stralers te beschrijven, en daarmee de moderne natuurkunde inluidde.



Afbeelding 1. Max Planck in 1938. Afbeelding: Hugo Erfurth via Wikimedia Commons.

In het vorige artikel in deze reeks besprak ik het leven en het werk van Ludwig Boltzmann. Boltzmann was een aanhanger van het atomisme, waarin stoffen worden beschreven door ze voor te stellen als opgebouwd uit heel veel kleine deeltjes: atomen. Tegenwoordig is dit de normaalste zaak van de wereld, maar in zijn tijd kreeg Boltzmann weinig bijval van zijn collega-natuurkundigen. Dit is aan te wijzen als een van de oorzaken voor de rusteloosheid en depressie van Boltzmann, die hem uiteindelijk tot zelfmoord hebben gedreven.

Toch was er nog vóór de dood van Boltzmann ook een andere natuurkundige die het atomisme toepaste in zijn werk, al was het met enige tegenzin. Die natuurkundige was Max Planck, die weleens de 'vader van de quantummechanica' wordt genoemd. In dit artikel vertel ik over het leven van Planck en over zijn werk over zwarte stralers. In dit werk deed hij de revolutionaire aanname dat deeltjes alleen specifieke energieën kunnen hebben – een aanname die de quantummechanica inluidde.

Max Planck

Op 23 april 1858 werd Max Karl Ernst Ludwig Planck geboren in de Duitse stad Kiel. De familie van Planck bestond uit gerespecteerde en betrouwbare advocaten, ambtenaren en geleerden, toegewijd aan de kerk en hun land. Deze karaktereigenschappen werden ook aan Planck doorgegeven. Op negenjarige leeftijd verhuisde Planck naar München, waar hij een aantal jaren later het Maximilian Gymnasium bezocht. Daar kreeg hij zijn eerste wetenschappelijke inspiratie van zijn wiskundeleraar. Wat Planck enthousiast maakte is dat je iets kon leren over de wereld door alleen logisch na te denken en je te houden aan bepaalde absolute wetten. Een van de wetten waar Planck aan gehecht was, was de wet van behoud van energie.

Na de middelbare school besloot Planck om natuurkunde te studeren, wat hij drie jaar deed aan de universiteit van München. Na afloop van die studie waren er geen posities beschikbaar, dus studeerde Planck verder; onder andere een jaar in Berlijn onder Hermann von Helmholtz en Gustav Kirchhoff. Hun colleges waren niet erg inspirerend voor Planck, maar hun publicaties des te meer. Hier ontdekte Planck ook het werk van Rudolf Clausius, wiens beschrijving van thermodynamica de rest van de wetenschappelijke gedachtegang van

Planck beïnvloede. Plancks proefschrift uit 1879 ging over de tweede hoofdwet van de thermodynamica. Hij onderzocht dat onderwerp omdat hij niet helemaal tevreden was met Clausius' definitie van onomkeerbaarheid. Het proefschrift kreeg weinig aandacht in de wetenschappelijke wereld. Toch vervolgde Planck in de daaropvolgende jaren zijn onderzoek naar de thermodynamica, resulterend in een reeks artikelen gepubliceerd tussen 1880 en 1892. Het eerste artikel hiervan gebruikte hij in zijn succesvolle sollicitatie voor privaatdocent aan de Universiteit van München, een onbetaalde baan. De reeks artikelen werd gebundeld en uitgegeven als boek in 1897. Het zou een van de standaard Duitse teksten over thermodynamica worden. Veel van de resultaten in die artikelen waren overigens onafhankelijke afleidingen van het thermodynamische formalisme ontwikkeld door de Amerikaan Josiah Gibbs, waar Planck niet bekend mee was.



Afbeelding 2. Een portret van Planck uit 1878. Afbeelding via Wikimedia Commons.

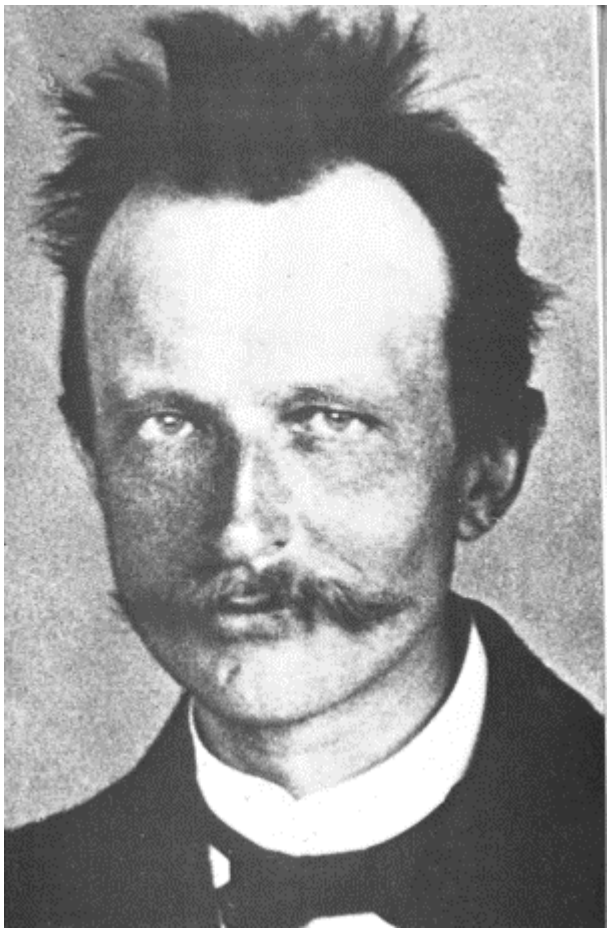
In 1887 kreeg Planck een positie als buitengewoon hoogleraar Theoretische Natuurkunde aangeboden aan de Universiteit van Kiel. Hierover zei Planck in zijn autobiografie[1] dat de dag dat hij dit nieuws ontving de meest blije dag van zijn leven was, omdat het betekende dat hij

op zichzelf kon gaan wonen, in plaats van met zijn ouders. In hetzelfde jaar trouwde Planck met Marie Merck, met wie hij vier kinderen kreeg: twee zonen en twee dochters. In 1889 kreeg Planck de leerstoel van Theoretische Natuurkunde in Berlijn aangeboden, waar hij Kirchhoff opvolgde. Dit was de plek die Boltzmann had geweigerd. Hij verhuisde samen met zijn vrouw in eerste instantie naar een huis in Berlijn, en later naar een villa in het nabijgelegen Grunewald, waar in latere jaren veel bekende wetenschappers, waaronder Albert Einstein, regelmatig op bezoek kwamen. Berlijn was belangrijk voor Planck, omdat hij hier voor het eerst in zijn carrière persoonlijk contact kreeg met Helmholtz en andere bekende wetenschappers.

Rond 1890 was het dispuut tussen Boltzmann en de energetici op volle sterkte. Planck zelf koos in deze discussie geen kant. Hoewel hij erg gesteld was op behoud van energie was Planck het oneens met de energetici, omdat hij vond dat dit behoud niet genoeg was om de natuurkunde mee op te bouwen; hij dacht dat er ten minste nog een ander principe nodig was. Hij wist zijn collega's echter niet te overtuigen met zijn theoretische argumenten, die in zijn ogen uitstekend waren. Ook met Boltzmann was Planck het niet helemaal eens; hij waardeerde namelijk de statistische argumenten niet. Planck wilde dat de tweede hoofdwet net zo algemeen gold als de wet van behoud van energie, maar volgens Boltzmann was dat niet het geval. De relatie tussen Boltzmann en Planck werd minder vriendschappelijk toen Ernst Zermelo, een student van Planck, de statistische ideeën van Boltzmann probeerde te weerleggen. Boltzmann reageerde hierop aanvallend, ook jegens Planck, die zijn student steunde. Pas toen Planck jaren later het atomisme gebruikte in zijn werk nam de ruzie af.

In 1896 raakte Planck geïnteresseerd in warmtestraling van *zwarte stralers*. Een zwarte straler is een theoretisch object dat alle straling absorbeert (en niet reflecteert) en daardoor opwarmt. De warmtestraling is vervolgens de elektromagnetische straling die ervoor zorgt dat het object warmte aan zijn omgeving afgeeft. Het *spectrum* van licht dat deze stralers uitzonden was alleen afhankelijk van de temperatuur – een eigenschap die Planck vanwege zijn passie voor absolute wetten erg aantrok. Ondanks dat Planck van nature conservatief en sceptisch over speculaties was, leidde zijn onderzoek op basis van logische argumenten tot een van de meest revolutionaire ideeën ooit. Nadat een aantal van de voorspellingen van Planck namelijk het spectrum niet goed bleken te beschrijven, liet hij zich inspireren door het werk van Boltzmann en veronderstelde hij dat de energie van de deeltjes in de stralers niet elke waarde kon aannemen, maar alleen kon voorkomen in bepaalde *energiequanta* – vast

bepaalde hoeveelheden. Hierbij introduceerde Planck een nieuwe constante, een *actiequantum*, tegenwoordig bekend als de constante van Planck. In de tweede helft van dit artikel zal ik verder op dit resultaat ingaan. Plancks publicatie over zwarte stralers en energiequanta is de reden dat hij bekendstaat als de vader van de quantummechanica.



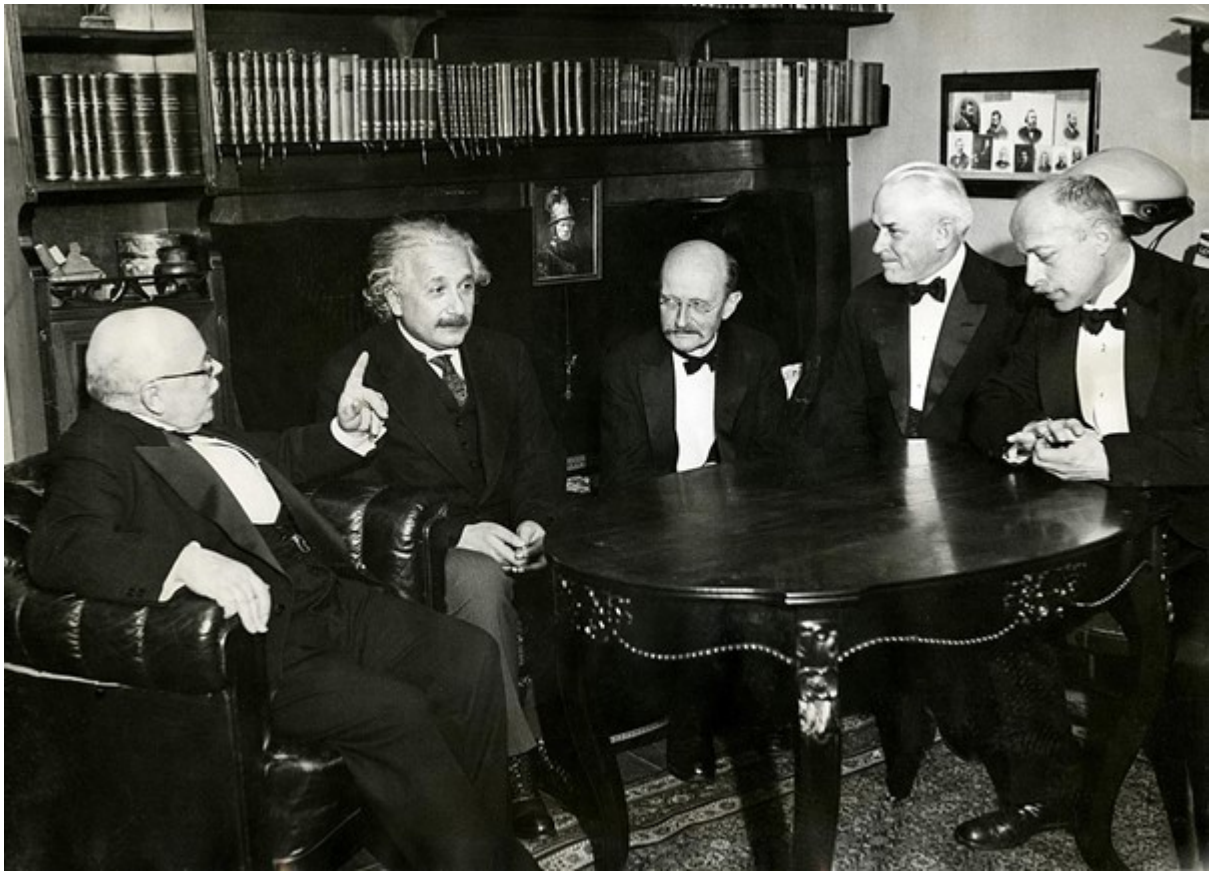
Afbeelding 3. Max Planck in 1901, op 43-jarige leeftijd. Afbeelding via Wikimedia Commons.

Planck was bescheiden, dus publiekelijk schepte hij niet veel op over het resultaat, ondanks de enorme gevolgen die het had voor de natuurkunde. Wel zijn er overleveringen die aantonen dat Planck het belang van zijn ontdekking inzag. Zo heeft zijn zoon gezegd dat tijdens een wandeling zijn vader tegen hem zei dat hij die dag een ontdekking had gedaan die net zo belangrijk was als de ontdekkingen van Newton. Toch gebeurde er de eerste jaren na de ontdekking nog weinig; ook Planck zelf richtte zich op ander onderzoek. In 1905 publiceerde Einstein zijn beroemde artikelen en in 1913 publiceerde Niels Bohr artikelen over de quantumtheorie van de elektronische structuur van atomen. Op beide zal ik terugkomen

in latere artikelen in deze serie. In de tussentijd heeft Planck gewerkt aan verschillende onderwerpen, waaronder de toen nieuwe relativiteitstheorie van Einstein. Op verzoek van onder andere Planck werd er een speciale leerstoel voor Einstein ingesteld, en zagen ze elkaar regelmatig, waardoor hun band uitgroeide tot een vriendschap.

Tijdens de eerste wereldoorlog trof Planck veel persoonlijk leed. Zijn eerste vrouw overleed in 1909. (Hij trouwde later opnieuw, met Marga von Hoesslin.) Van zijn vier kinderen overleed zijn oudste zoon in de oorlog in 1916. Van zijn dochters, een tweeling, overleed de eerste bij een bevalling in 1918. De zus voedde het kind op en trouwde later met de vader. Een jaar later overleed ook zij tijdens de bevalling. Alleen de jongste zoon overleefde, al kreeg Planck ook nog een andere zoon met zijn tweede vrouw.

Ondanks alle tegenslag werkte Planck verder aan de quantumtheorie, die na 1913 de interesse had van andere natuurkundigen. In 1918 ontving Planck de Nobelprijs voor zijn werk aan energiequanta. Een jaar later, in 1919 kreeg een student van Planck, Max von Laue, een positie in Berlijn, en toen Planck in 1928 op zeventigjarige leeftijd zijn leerstoel moest afstaan, werd die overgenomen door Erwin Schrödinger. Dit maakte Berlijn in die jaren het epicentrum van de theoretische natuurkunde. De colleges van Planck werden in 1930 uitgegeven in vijf delen, en de onderwerpen vormen nog steeds het prototype van natuurkundeonderwijs op universiteiten over de hele wereld. Na zijn pensioen bleef Planck actief, maar zijn aandacht verschoof deels naar meer filosofische vragen omtrent quantummechanica. Zo bleef Planck van mening dat de natuur deterministisch is (net zoals Gerard ’t Hooft).



Afbeelding 4. Een diner bij Max von Laue. V.l.n.r.: Nernst, Einstein, Planck, Millikan, von Laue. Afbeelding: Nationaal Archief, den Haag, via Wikimedia Commons.

Rond 1933 moest Planck voor zijn werkzaamheden op bezoek bij Adolf Hitler, waar hij op een gegeven moment ten gunste van zijn Joodse collega Fritz Haber sprak, die in de Eerste Wereldoorlog voor de Duitsers een rol had gespeeld in de ontwikkeling van gifgassen. Dit leidde tot een woede-uitbarsting van Hitler, waarop Planck niets anders kon doen dan in stilte luisteren. Planck sprak zich niet openlijk uit tegen het naziregime, maar het was duidelijk dat hij zich niet bij het gedachtegoed aansloot. Ook de jongste zoon uit het eerste huwelijk van Planck was het niet eens met Hitler. Hij was betrokken bij het complot van juli 1944, waarbij werd geprobeerd om een staatsgreep te plegen en Hitler om te brengen. Dit kostte hem zijn leven.

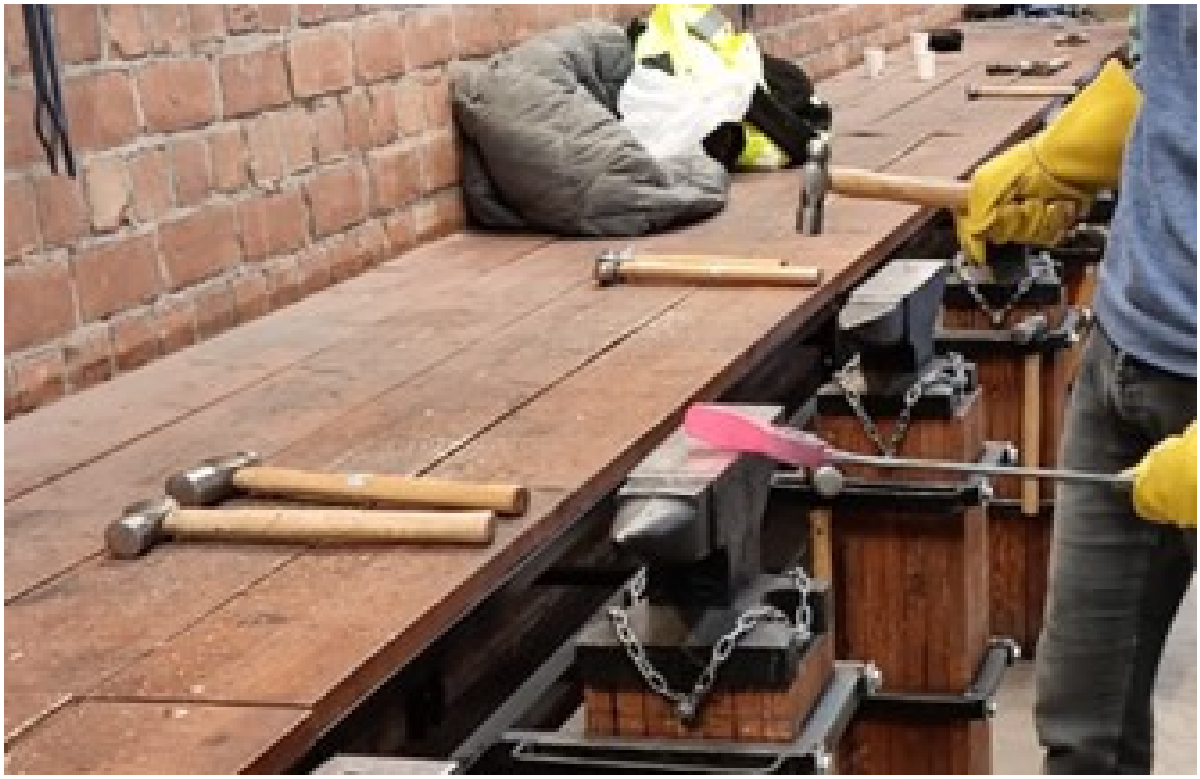
Tegen het eind van de Tweede Wereldoorlog werd de villa van Planck in Grunewald verwoest tijdens een bombardement op Berlijn. Daarbij gingen alle boeken en correspondentie van Planck verloren. Planck verhuisde naar Göttingen, maar reisde nog regelmatig naar plekken waar hij werd uitgenodigd om colleges te geven. Op 4 oktober 1947, vijf maanden voor zijn

negentigste verjaardag, overleed Planck. De lijst van onderscheidingen van Planck is te lang om op te noemen, maar zeker noemenswaardig is de Nobelprijs die Planck heeft ontvangen voor zijn werk. Ook wordt nog jaarlijks de Max Planck-medaille uitgereikt aan theoretische natuurkundigen; de eerste die deze medaille kreeg was Planck zelf.

Het werk van Planck

We zullen nog wat meer stilstaan bij het werk van Planck, en met name bij wat dat bijgedragen heeft aan de quantummechanica. Het vroege werk van Planck richtte zich vooral op de thermodynamica. Ook heeft Planck een tijd gewerkt aan fysische scheikunde, waarin hij thermodynamische afleidingen gaf van verscheidene chemische processen. In het begin van zijn tijd in Berlijn werkte Planck nog aan een ander onderwerp dat zijn passie had: muziek. Hij had toegang tot een groot harmonium, een toetsinstrument, gebouwd op verzoek van Helmholtz en met reine stemming[2]. Planck ontdekte in dit onderzoek, gepubliceerd in 1893, dat het gehoor voorkeur heeft voor een andere stemming: de getempereerde.

In 1896 begon Planck zijn onderzoek aan zwarte stralers, geïnspireerd door experimenteel werk dat was uitgevoerd aan het Nationaal Fysisch Laboratorium in Berlijn-Charlottenburg. Over zwarte stralers is al eerder geschreven op deze website, in dit artikel van Marcel Vonk. Ik zal ze hier nog kort toelichten. Zwarte stralers zijn hypothetische objecten die geen enkel licht weerkaatsen. Daarmee wordt niet alleen zichtbaar licht bedoeld, maar al het licht in het spectrum van elektromagnetische straling. Als deze objecten warm zijn ten opzichte van hun omgeving, moeten ze wel op een bepaalde manier hun energie kwijt, wat ze doen door licht uit te zenden. Dit is een bekend verschijnsel, wat je bijvoorbeeld kan herkennen als je denkt aan een metalen staaf die in een vuur opwarmt totdat hij roodgloeiend heet wordt: de staaf staat energie af door middel van het uitzenden van rood licht.



Afbeelding 5. Heet staal straalt zichtbaar licht uit. Een bekend verschijnsel in een smederij. Afbeelding gemaakt door de auteur.

Uit experimenten was al bekend hoeveel licht van elke golflengte (het spectrum) er wordt uitgezonden door zulke zwarte stralers, maar vanuit een theoretisch oogpunt was er nog geen goede verklaring voor hoe dit spectrum tot stand kwam. Er bestond wel al de wet van Wien, vernoemd naar Wilhelm Wien, die goed overeenkwam voor korte golflengtes maar die niet klopte voor lange golflengtes. De berekening van Wien gebruikte thermodynamische argumenten en werd gepubliceerd in 1896. Ook bestond de wet van Rayleigh-Jeans, die juist goed werkte voor lange golflengtes maar niet klopte voor korte golflengtes. De eerste vorm van deze wet, gepubliceerd in 1900 door Lord Rayleigh, werd afgeleid door de zwarte straler voor te stellen als een soort trillende snaar (of beter gezegd, een collectie van trillende snaren), zoals een gitaarsnaar, met een vaste lengte. De fout in de afleiding was dat werd gesteld dat elke mogelijke trilling ongeveer evenveel energie had, waardoor de afleiding werkte voor lange golflengtes, maar niet voor korte golflengtes – daar zijn nog bepaalde extra aannames nodig.

In zijn beroemde artikel uit eind 1900 wist Planck als eerste de juiste formule voor het spectrum van zwarte stralers uit te rekenen. Hiervoor gebruikte hij ideeën uit het werk van Wien en Rayleigh, maar voegde hij ook nog een cruciaal element toe: hij stelde dat de

energie van zo'n snaar niet élke, oneindig opdeelbare, waarde aan kon nemen, maar alleen bepaalde waardes, die hij 'energie-elementen' noemde. Deze introduceerde Planck in zijn artikel als volgt (in het Duits):

> Hierzu ist es notwendig, U_N nicht als eine stetige, unbeschränkt teilbare, sondern als eine discrete, aus einer ganzen Zahl von endlichen gleichen Teilen zusammengesetzte Grösse aufzufassen. Nennen wir einen solchen Teil ein Energielement ε, so ist mithin zu setzen: …

Daarnaast gebruikte Planck de statistische mechanica van Boltzmann, wat hij aanvankelijk niet zo'n aantrekkelijk idee vond. Hij had namelijk de beschrijving van entropie van Boltzmann nodig (de formule die op de grafsteen van Boltzmann is geschreven) een beschrijving gebaseerd op de kans dat het systeem zich in de gegeven configuratie bevindt. Planck was niet gecharmeerd van deze beschrijving van entropie, omdat het gevolg ervan is dat de tweede hoofdwet van de thermodynamica (die zegt dat entropie altijd toeneemt) geen absolute wet is, maar een statistische wet, terwijl Planck juist hield van absolute wetten. Hij noemde het zelfs "een wanhoopsdaad. Ik was bereid om al mijn eerdere fysische overtuigingen op te offeren."

Toch combineerde Planck het werk van Wien, Rayleigh en Boltzmann met zijn revolutionaire idee van energie-elementen, waarmee hij een uitdrukking vond voor de energie die een zwarte straler uitzendt voor elke golflengte die perfect overeenkwam met de meetresultaten. Tevens wist hij de energie van zijn energie-elementen uit te rekenen. Hij schreef dit in zijn artikel als volgt:

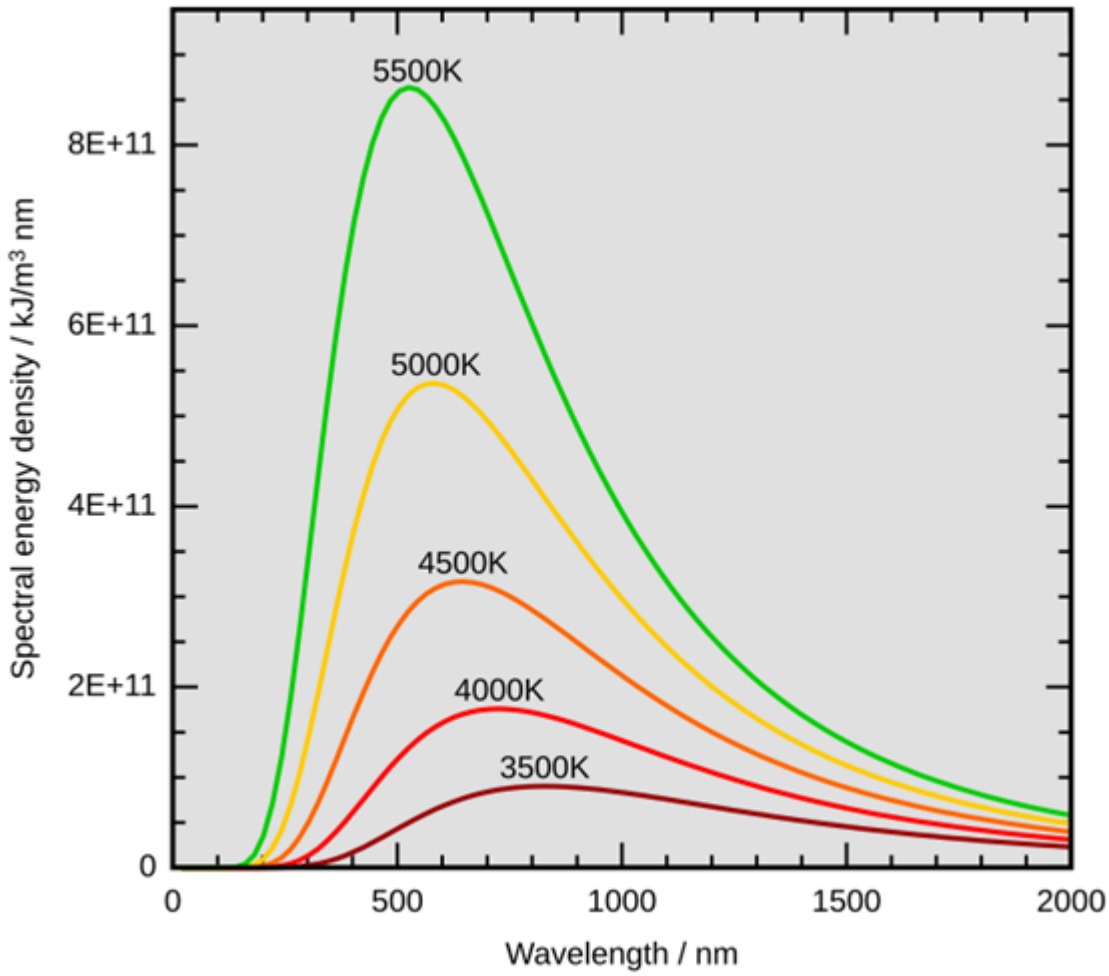
> Wenden wir das Wien'sche Verschiebungsgesetz in der letzten Fassung auf den Ausdruk der Entropie S an, so erkennen wir, dass das Energieelement E proportional der Schwingungszahl ν sein muss, also:

met daaronder de formule

$$E=h\nu=\frac{hc}{\lambda}, $$

die we ook tegenwoordig nog zo schrijven. Hierin is E zo'n energie-element, h een constante die we tegenwoordig de constante van Planck noemen, en ν de frequentie van de trilling die gerelateerd is aan de golflengte λ met behulp van de lichtsnelheid c door middel van $\nu=\frac{c}{\lambda}$. In Plancks tijd was dit een revolutionair idee, maar deze formules leren leerlingen tegenwoordig vaak al bij natuurkunde op de middelbare school.

De waarde van de constante h kon Planck uitrekenen door zijn formule voor het spectrum van de zwarte stralers over de meetresultaten heen te leggen, waarmee hij een getal vond dat niet ver van de huidig vastgestelde waarde van $h=6{,}62607015\times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$. Tegenwoordig zijn de SI-eenheden overigens zo gedefinieerd dat dit laatste de exacte waarde is.



Afbeelding 6. Het spectrum van een zwarte straler bij verschillende temperaturen. Afbeelding via Wikimedia Commons.

De aanname dat energie alleen in de vorm van energie-elementen voor kan komen, wordt gezien als de geboorte van de quantummechanica en de grootste intellectuele prestatie van Planck. Toch gebeurde er de eerste jaren maar weinig met het artikel waarin Planck zijn ideeën opschreef. Pas in 1905, toen Albert Einstein zijn beroemde artikel over het foto-elektrisch effect publiceerde, werd de interesse in het artikel van Planck groter. Einstein is de hoofdrolspeler van het volgende artikel in deze reeks; hij heeft de term 'quanta' geïntroduceerd die tegenwoordig wordt gebruikt in plaats van Plancks 'element'. Planck was huiverig over het artikel van Einstein, omdat Einstein lichtdeeltjes (fotonen) introduceerde, wat quanta van licht zijn, waardoor Planck dacht dat de uitgebreid bevestigde theorie van Maxwell verworpen zou moeten worden.

De latere wetenschappelijke activiteit van Planck heb ik al eerder in dit artikel kort belicht: na het verschijnen van het artikel van Niels Bohr in 1913 over de quantisatie van het waterstofatoom focuste Planck, evenals veel andere natuurkundigen, volledig op de quantummechanica. Planck wist het resultaat van Bohr, ongeveer tegelijk met twee andere natuurkundigen, te veralgemeniseren naar een systeem met meerdere elektronen. Tot zijn pensioen werkte Planck verder aan verscheidene problemen binnen de thermodynamica en de jonge quantummechanica. Na zijn pensioen hield hij zich echter bezig met meer filosofische vraagstukken, bijvoorbeeld over *causaliteit*, wat betekent dat een oorzaak eerder komt dan het gevolg, en *determinisme*, wat betekent dat de precieze toestand op een bepaald moment de toekomst volledig voorspelt. Zo was Planck erg positief over het werk uit 1926 van zijn opvolger, Erwin Schrödinger, met daarin de Schrödingervergelijking, omdat hij dit zag als een remedie tegen de op dat moment sceptische houding van veel fysici tegenover de rol van causaliteit in de natuurkunde. Daarentegen was Planck niet enthousiast over de "Kopenhaagse interpretatie" van de quantummechanica, ontwikkeld door onder anderen de eerder genoemde Bohr en door Werner Heisenberg en Max Born, die we in latere artikelen in deze reeks nog tegen zullen komen. De Kopenhaagse interpretatie is tegenwoordig een van de gangbare interpretaties van de quantummechanica, maar de interpretatie is niet deterministisch. In verscheidene publicaties schreef Planck, met behulp van zijn scherpe fysische argumenten, over determinisme in de natuurkunde. Dat alles terwijl zijn geesteskind – de quantummechanica – steevast de andere kant op ging.

De belangrijkste bron van dit artikel is de autobiografie van Planck, waarvan de Engelse vertaling is getiteld ‘A scientific autobiography’. Dit is aangevuld met het door Max Born geschreven overlijdensbericht voor Planck en met het artikel van Planck uit 1900, getiteld ‘Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum’.

[1] Te vinden in het boek ‘Scientific autobiography and other papers’ van Max Planck.

[2] Dit is een stemming waarbij muzikale intervallen gebaseerd zijn op breuken van kleine gehele getallen.