

Van elektron tot higgsboson

Van vacuümbuis tot deeltjesbotser en van Wilsonvat tot pixeldetector deel 1

In 2022 memoreren we de tiende verjaardag van de experimentele ontdekking van het higgsboson, het sluitstuk van het standaardmodel. Dat biedt een mooie gelegenheid om de ontdekking van het eerste elementaire deeltje, het elektron, nu 125 jaar geleden, nog eens in detail te belichten. Een belangrijke experimentele techniek, het nevelvat, werd op hetzelfde moment ontwikkeld. Beide doorbraken stonden aan de wieg van het onderzoek in de deeltjesfysica.

In 2022 is het tien jaar geleden dat de ontdekking van het higgsboson wereldkundig werd gemaakt [1,2]. De ontdekking volgde op een decennialange experimentele inspanning die sterk werd gedreven door het steeds maar succesvoller standaardmodel – een voorspelling van de massa [9] van het higgsboson gaf het standaardmodel echter niet, hetgeen een extra uitdaging opleverde voor het experimenteel aantonen van het deeltje.

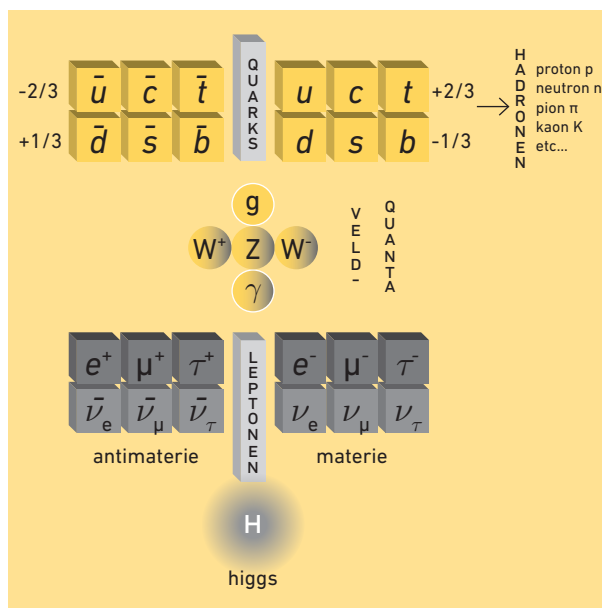
Vormde de ontdekking van het higgsboson het sluitstuk van het standaardmodel, dan was de ontdekking van het elektron in 1897 het begin ervan. Experimenteel gezien was die ontdekking niet minder uitdagend dan die van het higgsboson omdat de experimentele verkenningen van die tijd nog nauwelijks een conceptueel kader kenden. Er was geen model waarbinnen gezocht werd.

Het standaardmodel begon met de quantumelektrodynamica, geformuleerd in de eerste helft van de twintigste eeuw. De zwakke wisselwerkingen werden vervolgens verenigd met de elektromagnetische en de sterke wisselwerkingen werden toegevoegd, tot een model gebaseerd op een relativistische quantumveldentheorie met lokale ijkinvariantie. We verwijzen naar figuur 1 waarin de ingrediënten van het complete standaardmodel bij elkaar staan.

Een ‘sluitend’ standaardmodel betekent overigens geen ‘afsluiting’ van de fysica van elementaire deeltjes en velden, daarvoor kent het standaardmodel nog te veel vrije parameters. Ook is het niet bevredigend dat het standaardmodel geen plaats biedt aan de ‘omni-presente’ zwaartekracht. Verder blijft de overduidelijke aanwezigheid van donkere materie in de kosmos ook onverklaard.

Het Cavendishlaboratorium eind negentiende eeuw

Met enig gevoel voor drama zouden we kunnen zeggen dat de subatomaire fysica werd geboren op 7 augustus 1897 toen J.J. Thomson de laatste pagina van zijn net voltooide artikel droogwapperde: *Cathode Rays* was de korte titel ervan. Het beschreef, nu 125 jaar geleden en 115 jaar voor de ontdekking van het higgsboson, de ontdekking van een nieuw deeltje, *corpuscle* genoemd, nu elektron geheten. Thomson verrichtte een meting van de verhouding van de massa m en de lading e van het elektron. Deze verhouding was duizendmaal kleiner dan de kleinste verhouding tot dan bekend, die voor het waterstofion. Het artikel werd in oktober van 1897 gepubliceerd in het gezaghebbende *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* [3]. Thomson was als hoogleraar verbonden aan het Cavendishlaboratorium in Cambridge. Daar werkte onder zijn supervisie ook C.T.R. Wilson als Clerk-Maxwellstudent. Deze had in maart 1897 een door Thomson aanbevolen artikel voltooid, gepubliceerd in de *Philosophical Transactions* getiteld *Condensation of Water Vapour in the presence of Dust-free Air and other Gases*. Daarmee legde Wilson, aanvankelijk onbedoeld, de basis voor de eerste detector die sporen zichtbaar kon maken van geladen deeltjes: het expansie-nevelvat [4,6]. In 1898 publiceerde Thomson de eerste meting van de lading van het elektron gebruikmakend van Wilsons nevelvat.



Figuur 1. Prent van de deeltjes en velden (veldquanta) uit het standaardmodel. De quarks komen niet voor als vrije deeltjes, net zo min als de gluonen (g); quarks binden met gluonen (via de sterke wisselwerking) tot materie zoals we die kennen: protonen en neutronen die samen via diezelfde sterke wisselwerking atoomkernen vormen. Daaraan binden elektronen (e) via de elektromagnetische wisselwerking (via fotonen, γ), vormen atomen en moleculen.

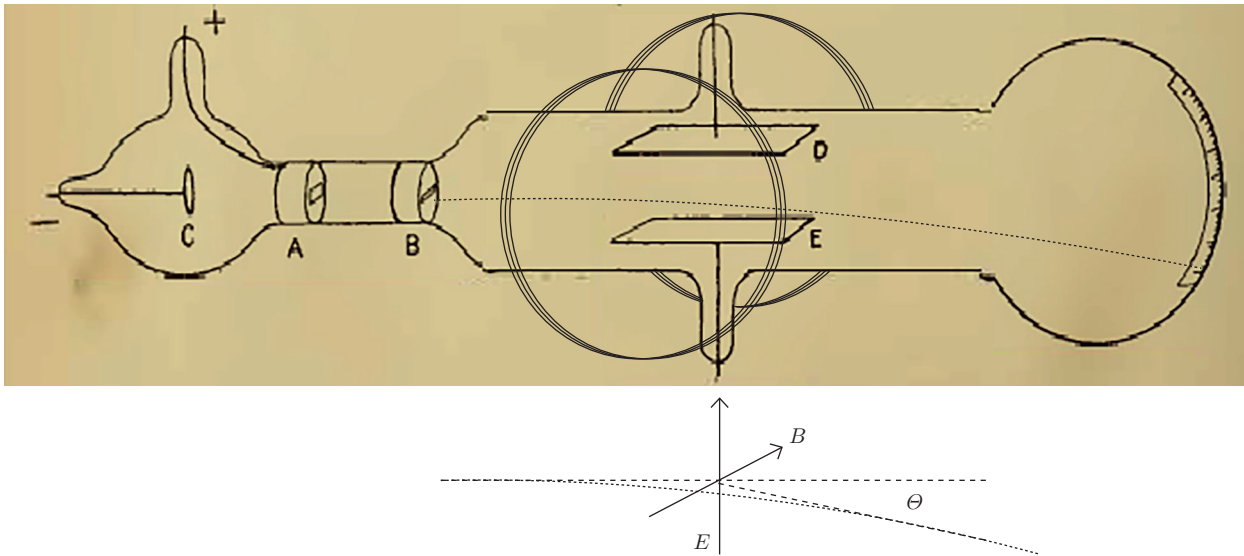
Zowel J.J. Thomson als C.T.R. Wilson wonnen de Nobelprijs voor hun baanbrekende werk, in respectievelijk 1906 en 1927.

De experimenten van Thomson: kathodestralen in gasontladingsbuizen

De context van het werk van Thomson werd gevormd door de kennis van elektriciteit en magnetisme zoals vergaard door onder andere Faraday en samengevat in de Maxwellvergelijkingen; door apparatuur waarmee elektriciteit en magnetisme konden worden opgewekt en door instrumenten waarmee metingen konden worden verricht. De apparatuur omvatte onder andere accu's, inductiespoelen, Helmholtzspoelen; de instrumenten galvanometers en andere stroom- en spanningsmeters. Ook waren vacuümpompen (met name kwikpompen) nodig.

Begrippen als 'positieve' en 'negatieve' elektriciteit waren bekend, maar het atoommodel dat nu het vanzelfsprekende uitgangspunt vormt voor heel veel natuurwetenschappelijk onderzoek, was dat nog niet. Wel was bekend dat de materie bestond uit elementen, atomaire bouwstenen (zoals gerangschikt in de tabel van Mendelejev) – maar de substructuur van deze atomen was nog onbekend.

Een bijzondere rol in het onderzoek van Thomson speelde een gasontladingsbuis zoals weergegeven in figuur 2. Hiermee werd geleiding van elektriciteit door gassen bestudeerd. De kathode C wordt daarbij op een negatieve spanning van rond 2 kV gezet met behulp van een inductiespoel. Anodes A



Figuur 2. Gasontladingsbuis van Thomson; de kathodestraal wordt uitgezonden door de kathode C, gecollimeerd door anodespleten A and B en kan worden afgebogen door een elektrisch veld tussen elektrodes D and E (elk 5 cm x 2 cm; 1,5 cm uit elkaar). Loodrecht op de richting DE en op de kathodestraal kan een magnetisch veld worden aangelegd door twee Helmholtzspoelen met een diameter van 5 cm. (De figuur, zonder de ingetekende spoelen en kathodestraal is afkomstig uit het oorspronkelijke artikel van Thomson [3].)

en B zijn geaard en bevatten spleten zodat de kathodestraal voor een deel doorgelaten wordt en onderzocht kan worden. De straal is zichtbaar door het oplichtende gas langs de baan en produceert een groene fluorescentievlek op het glas aan het eind van de buis. Om de straal zo min mogelijk te verstoren (te verstrooien) moet het gas in de buis op zo laag mogelijke druk worden gebracht. Bij een aantal metingen zo laag dat de kamer verduisterd moest worden om het groene vlekje nog te kunnen waarnemen. (Bij lagere druk neemt de geleidbaarheid van het gas af en daarmee de stroomsterkte.) Dat de kathodestraal bestond uit snelle, negatieve deeltjes was verre van algemeen geaccepteerd. Het was ook mogelijk dat kathodestrallen een niet nader gespecificeerde excitatie van de ether waren. Het feit dat het niemand gelukt was de stralen af te buigen in een elektrisch veld pleitte tegen de deeltjesinterpretatie. Dat lukte Thomson wel, door een adequaat vacuüm te creëren. Vooral het gas dat aan de wand van de buis en aan de elektrodes geadsorbeerd zat was een probleem. Het kwam vrij door de kathodestrallen, verslechterde het vacuüm en zorgde voor geleiding tussen de elektrodes D en E (figuur 2) waardoor het veld wegviel en dus geen afbuiging kon geven. Herhaald bedrijven van de kathodestraalbuis, zonder tussendoor het vacuüm te verbreken, leidde tot een soort ‘uitbakken’ en uiteindelijk tot een vacuüm dat goed genoeg was om het veld tussen D en E te handhaven. De aldus geoptimaliseerde apparatuur stelde Thomson in staat een systematisch meetprogramma af te werken en de eerste meting van m/e te verrichten. Die verhouding was drie ordes van grootte kleiner dan de kleinste waarde tot dan toe bekend (van waterstof, uit elektrolyse). Daarmee was het (achteraf [10]) duidelijk dat een nieuw bestanddeel van de materie was ontdekt.

Hieronder geven we een zeer korte samenvatting van Thomsons experimenten en leggen de nadruk op de meest directe methode voor het meten van m/e . Complementaire metingen, ook door Thomson uitgevoerd en met vergelijkbare resultaten, die gebruikmaakten van calorimetrie met behulp van thermokoppels laten we hier buiten beschouwing.

De metingen van Thomson

Zie het kader voor het verband tussen de afbuighoek van de kathodestrallen (figuur 2) en de magnetische inductie, respectievelijk de elektrische veldsterkte. Thomson deed een hele serie metingen bij diverse E - en B -velden en met diverse gassen (lucht, waterstof, koolstofdioxide) en verschillende kathodes (Al, Pt, Fe). De resultaten voor m/e waren steeds dezelfde. Daarmee was aangetoond dat de corpuscles universeel voorkwamen en niet materiaalafhankelijk waren. Een typisch resultaat geven we hier weer: $\theta = 8/110$, $B = 5,5$, $E = 1,5 \cdot 10^{10}$, $l = 5$ cm; dan volgt $m/e = 1,3 \cdot 10^{-7}$ en $v = 2,8 \cdot 10^9$ cm/s. Over het gebruikte eenhedenstelsel is Thomson in [3] weinig mededeelzaam. Nadere beschouwing leert dat hij gebruikmaakt van het elektromagnetische cgs-stelsel. De eenheid van magnetische inductie (B) is daarin de gauss, de elektrische veldsterkte wordt gemeten in eenheden van 10^{-6} V/m en lading in eenheden van 10 coulomb. In SI-eenheden vindt hij dus: $m/e = 1,3 \cdot 10^{-11}$ kg/C (of $0,57 \cdot 10^{-7}$ g/emu), ongeveer een factor twee te groot in vergelijking met de nu bekende waarde. Het magneetveld is 5,5 gauss, de daarvoor benodigde stroomsterkte in de spoel is 10 A; de elektrische veldsterkte is 15.000 V/m, dus 150 V/cm, dus 375 V over de 2,5 cm tussen de platen. De spanningsbron die Thomson gebruikte was een accu (“a battery of storage cells”), waarover hij verder geen details geeft.

AFBUIGING VAN EEN GELADEN DEELTJE IN EEN ELEKTRISCH EN EEN MAGNETISCH VELD

In figuur 2 zijn de elektrodes D en E aangegeven. De cirkels representeren twee Helmholtzspoelen.

Een elektrische veldsterkte E tussen de elektrodes oefent op een lading e een kracht $F=eE$ uit. Als de lading gedragen wordt door een deeltje met massa m , krijgt het deeltje dan een versnelling $a=eE/m$. Deze versnelling werkt in de verticale richting, loodrecht op de horizontale richting waarlangs het deeltje met snelheid v het gebied tussen de elektrodes binnenkomt. De tijd die het deeltje er over doet om de weg tussen de elektrodes af te leggen is $t=l/v$. In die tijd krijgt het een verticale snelheid $v_{\perp}=(eEl)/(mv)$. De hoek θ_e waarover het deeltje wordt afgebogen is v_{\perp}/v en dus:

$$\theta_e = \frac{eEl}{mv^2} \quad (1)$$

Een magnetische inductie B loodrecht op de baan van een deeltje met massa m , lading e en snelheid v geeft aanleiding tot een kracht F loodrecht op de baan en loodrecht op de richting van het magnetische veld, die gelijk is aan evB (de Lorentzkracht,

Thomson verwijst er niet expliciet naar). Deze kracht geeft aanleiding tot een cirkelbaan met straal r waarvoor geldt: $mv^2/r=evB$ en dus $r=mv/eB$. Als het deeltje wordt afgebogen over een hoek θ legt het een afstand $\theta r \simeq l$ af in het magneetveld en zo vinden we voor de magnetische afbuigingshoek:

$$\theta_m = \frac{eBl}{mv} \quad 2$$

Wanneer bij gegeven veld $E(B)$ het veld $B(E)$ zo gekozen wordt dat $\theta_e = \theta_m$ dan volgt

$$v = E/B \quad (3)$$

en

$$\frac{m}{e} = \frac{B^2 l}{E\theta} \quad (4)$$

en zijn dus v en m/e experimenteel te bepalen bij bekende E , B en l en na meting van θ .

De snelheid van de deeltjes in de kathodestraal is opmerkelijk: ongeveer 10% van de lichtsnelheid. Deze snelheid maakt, zeker gezien de precisie van Thomsons metingen, nog geen relativistische correcties nodig, correcties die overigens nog niet beschikbaar waren. (Wel werden al in 1902 relativistische effecten gemeten aan de elektronen – met snelheden tot 95% van de lichtsnelheid – uitgezonden door radioactief radium, met name door Kaufmann. Lorentz gaat hier in zijn beroemde artikel [5] uit 1904 uitvoerig op in.)

Korte discussie

Thomson vond dus een universeel bestanddeel van de materie dat niet eerder bekend was: een deeltje met negatieve lading en een lading-massaverhouding 1700 maal groter, namelijk $1,7 \cdot 10^7$ “in the c.g.s. system of magnetic units” dan de grootste verhouding tot dan bekend, die van het waterstofion. Bij de aanvaarding van de Nobelprijs zei Thomson: “Before the cathode rays were investigated, the charged atom of hydrogen met with in the electrolysis of liquids was the system which had the greatest known value of e/m , and in this case the value is only 10^4 .”

Ongeveer een jaar eerder observeerde Zeeman in Leiden de verbreding (en met betere resolutie: opsplitsing) van spectraallijnen onder invloed van een magnetisch veld. Dit Zeemaneffect werd heel kort na de ontdekking ervan verklaard door Lorentz in termen van door het magneetveld beïnvloede ‘lichtionen’ (elektronen) waarvan de e/m -verhouding een factor duizend groter was dan van het waterstofion [8].

In deel 2 van dit artikel zullen we in meer detail ingaan op de uitvinding van het nevelvat en de rol ervan bij de ontdekking van nieuwe elementaire deeltjes. We zullen afsluiten

met een zeer compacte verwijzing naar de verdere ontwikkeling van versnellers en detectoren die uiteindelijk de ontdekking van het higgsboson mogelijk maakten.

Dankwoord

Ik dank Frans van Lunteren voor het mij opmerkelijk maken op [7].

Jos Engelen is emeritus hoogleraar hoge-energiefysica aan de UvA/Nikhef. Hij was betrokken bij het wetenschappelijke programma van CERN en DESY en bij de beginfase van ANTARES (astrodeeltjesfysica). Hij bekleedde onder andere het directoraat van Nikhef, het wetenschappelijke directoraat van CERN en het voorzitterschap van NWO.

REFERENTIES EN NOTEN

- 1 ATLAS Collaboration, G. Aad et al., *Physics Letters B* **716**, 1-29 (2012).
- 2 CMS Collaboration, S. Chatrchyan et al., *Physics Letters B* **716**, 30-61 (2012).
- 3 J.J. Thomson, XL, *Cathode Rays*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, **44-269**, 293-316 (1897).
- 4 C. T. R. Wilson, *Condensation of Water Vapour in the presence of Dust-free Air and other Gases*, *Phil. Trans.*, A **189**, 265-307 (1897).
- 5 H. A. Lorentz, *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity less than that of Light*, *Proc. KNAW*, Amsterdam, 6 (1904).
- 6 Charles Thomson Rees Wilson, *On an expansion apparatus for making visible the tracks of ionising particles in gases and some results obtained by its use*, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* **87-595**, 277-292 (1912).
- 7 O.W. Richardson, *The Electron Theory of Matter*, Cambridge at the University Press (1914).
- 8 Jos Engelen, *NTvN* **86-11**, 36 (2021).
- 9 De massa's van de deeltjes in het standaardmodel zijn onderling heel verschillend en worden experimenteel bepaald. Het is gebruikelijk de eenheid GeV/c^2 te gebruiken. Ter referentie: de massa van een proton is ongeveer $1 \text{ GeV}/c^2$.
- 10 De aanwijzing van Thomson als ‘de’ ontdekker van het elektron is wetenschapshistorisch gezien een te eenvoudige voorstelling van zaken. Behalve de bekende bijdragen van Lorentz en Zeeman leverden ook andere meer of minder bekende fysici een bijdrage. Een heel mooi overzicht staat in hoofdstuk 1 van [7].