Van elektron tot higgsboson

Van vacuümbuis tot deeltjesbotser en van Wilsonvat tot pixeldetector deel 2

Het expansie-nevelvat werd ontwikkeld als de eerste detector van sporen achtergelaten door subatomaire deeltjes. Samen met de ontwikkeling van het bellenvat, in zekere zin voortkomend uit die van het nevelvat, leidde dit tot een 'explosie' van nieuwe deeltjes ontdekt in kosmische stralen en bij de eerste protonversnellers. Zowel theoretisch als experimenteel volgden hierop razendsnelle ontwikkelingen, een eeuw na Wilsons eerste waarnemingen van deeltjessporen culminerend in de experimentele ontdekking van het higgsboson.

Het expansie-nevelvat van Wilson

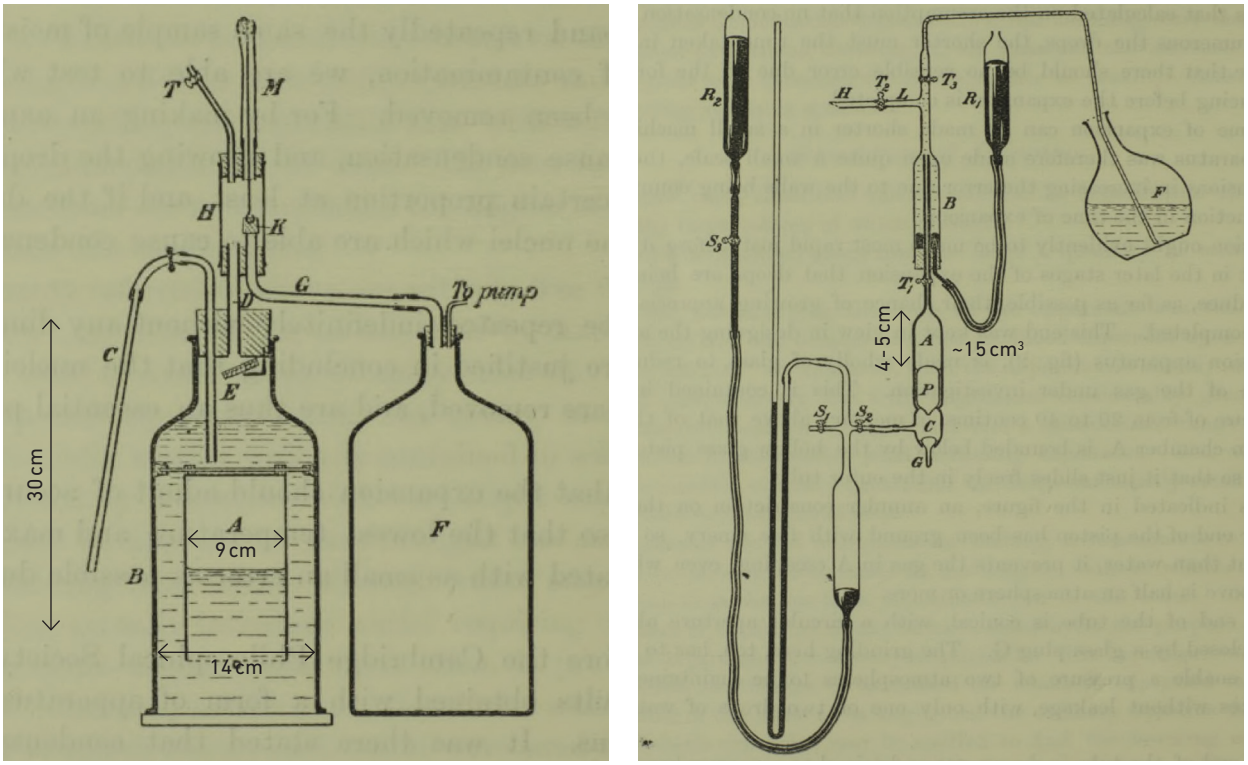
In figuur 1 is de opstelling weergegeven die Wilson gebruikte om te bestuderen onder welke omstandigheden wolkvorming in vochtige lucht optrad. Hij was gefascineerd door atmosferische verschijnselen zoals hij die vanuit een observatorium op de Ben Nevis had waargenomen en wilde die onder gecontroleerde omstandigheden bestuderen. Al snel verschoof de nadruk van het onderzoek naar de wolkvorming zelf en in het bijzonder naar de aard van de condensatiekernen die 'regen-' of 'mist-'vorming in de laboratoriumexperimenten veroorzaakten.

Via adiabatische expansie creëerde Wilson met waterdamp oververzadigde lucht (ook deed hij onderzoek aan andere gassen). Afhankelijk van de mate van oververzadiging, bepaald door de verhouding tussen eind- en beginvolume V_2/V_1, onderscheidde hij drie regimes: voor $V_2/V_1 < 1{,}25$ zag hij geen condensatie, voor V_2/V_1 tussen 1,25 en 1,38 nam hij vorming van druppels (net boven 1,25 enkele druppels – "*a few scattered drops*") waar en boven 1,38 een dichte mist. De cruciale ontdekking voor de latere ontwikkeling van het nevelvat als deeltjesdetector was dat deze mistvorming ook plaatsvond tussen 1,25 en 1,38 (oververzadiging tussen een factor vier en acht) als de ruimte met oververzadigde waterdamp werd blootgesteld aan röntgenstralen. Het nieuws van Röntgens ontdekking bereikte de wereld pas in de herfst van 1895. Begin 1896 deed Thomson (Wilsons supervisor) al experimenten aan de geleidbaarheid van gassen blootgesteld aan röntgenstralen en Wilson kon de röntgenbuis van Thomson lenen voor zijn experimenten. De buis was gefabriceerd door Thomsons technisch assistent, aangeduid als Mr. Everett in de dankwoorden van Thomsons artikelen. In zijn Nobelvoordracht noemt Wilson deze Mr. Everett expliciet. (In zijn 'ontdekkingspublicatie' [1] noemt Thomson hem nog abusievelijk Mr. Everitt.)

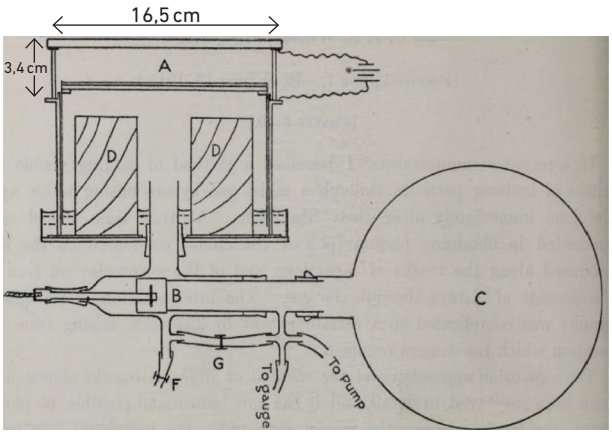
Het werd vrij snel duidelijk dat Wilsons ontdekking van de rol van geladen deeltjes als condensatiekernen voor oververzadigde (water)damp niet alleen een op zichzelf staand interessant verschijnsel betrof, dat vroeg om een systematische studie, maar ook dat toepassingen mogelijk waren op het gebied van het fundamentele onderzoek van die tijd. In het bijzonder bouwde Thomson voort op Wilsons resultaten om een eerste meting van de lading van het elektron te verrichten. Wilson zelf bouwde voort op zijn 'nevelmethode' om van het nevelvat een detector voor spoordetectie van bewegende geladen deeltjes te maken: het bleek een apparaat voor ontdekkingen.

Eerste meting van de lading van het elektron

Een jaar na zijn ontdekking van het elektron [1] voltooit Thomson de eerste meting van de lading ervan [3]. Hij



Figuur 1. Links: de eerste nevelvatopstelling van Wilson. Het volume A wordt oververzadigd met waterdamp door de stop K weg te trekken en zo verbinding te maken met de vacuüm getrokken ruimte F. Daardoor loopt E vol met water en neemt het volume A toe. Rechts: de tweede opstelling, kleiner, voor snellere expansie; ook gebruikt om wolkvorming in andere gassen dan lucht te bestuderen. Volume C wordt door de pomp op overdruk gebracht waardoor zuiger P naar boven schuift en volume A op overdruk brengt. Vervolgens wordt stop G geopend, schiet de zuiger P naar beneden en vindt in A adiabatische expansie plaats. (In [2] beschrijft Wilson uitgebreid aan welke eisen de opstelling (*the machine*) moet voldoen om niet aan diggelen te vliegen als de zuiger naar beneden schiet.)



Figuur 2. Wilsons expansie-nevelvat waarin hij voor het eerst sporen zichtbaar maakte in cilindervormige ruimte A. De sporen werden verlicht met een kwiklamp en gefotografeerd.

maakt daarbij gebruik van de door zijn promovendus Wilson eveneens in 1897 ontdekte 'nevelmethode' (*cloud method*) [2]. Wilson had laten zien dat adiabatische expansie van een met waterdamp verzadigd volume lucht leidde tot vorming van neveldruppeltjes rond condensatiekernen die werden gecreëerd door röntgenstralen. Het lag voor de hand dat deze condensatiekernen daarom bestonden uit positieve en negatieve 'ionen' (elektronen). In theorie gaat de meting als volgt: na blootstelling aan röntgenstralen wordt de stroomsterkte bij bekend spanningsverschil in het volume lucht gemeten. Voor n elektronen, lading e, per volume-eenheid volgt een stroomsterkte nev, als v de snelheid van de elektronen is. Uit eerder onderzoek (met name van Rutherford) was v bekend. Om n te bepalen gebruikte Thomson nu de 'nevelmethode' ontwikkeld door Wilson. De hoeveelheid water die tot mist condenseert bij een bepaalde expansie kan berekend worden, als vervolgens de grootte van de mistdruppels bekend is, kan het aantal ervan, n, bepaald worden. Samen met de gemeten waarde van ne is aldus e te bepalen. Het was geen eenvoudig experiment. "*The measurement of the size of the drops in the cloud gave a great deal of trouble*" schrijft Thomson. Hij bepaalt de druppelgrootte tenslotte door de snelheid waarmee de mist naar beneden zakte te meten. Andere onzekerheden waren onder meer: de (on)gelijkheid van de effectiviteit van de positieve en negatieve condensatiekernen om druppels te vormen – dit weer gerelateerd aan de snelheid waarmee de adiabatische expansie uitgevoerd werd – en de stabiliteit van de röntgenbuis. Als resultaat vindt Thomson $e = 6{,}5 \cdot 10^{-10}$ esu en in een later experiment [5] (met een stabiele radiumbron in plaats van de röntgenbuis, met een gevoeligere meting van de stroomsterkte en met beter begrip van de nevelvorming) $e = 3{,}4 \cdot 10^{-10}$ esu. (De nu bekende waarde is $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ esu.) (In 1909 deed Millikan zijn beroemde meting aan geladen oliedruppeltjes die maatgevend werd voor de eerste precisiemeting van de eenheidslading.) In [4] verwijst Thomson voor het eerst naar de massa van het nieuwe deeltje: als de lading, zoals gemeten, inderdaad gelijk is aan die van het waterstofion, moet de massa ervan meer dan duizend keer kleiner zijn en moet er dus sprake zijn van een subatomair deeltje. In zijn woorden: "*...we have clear proof that the ions have a very much smaller mass than ordinary atoms ; so that in the convection of negative electricity at low pressures we have something smaller even than the atom, something which involves the splitting up of the atom, inasmuch as we have taken from it a part, though only a small one, of its mass.*"

Het nevelvat als spoordetector: een apparaat voor ontdekkingen

Het expansie-nevelvat had meer ontdekkingen in petto. Rond 1910 begon Wilson met experimenten om de sporen zichtbaar te maken die geladen, ioniserende deeltjes die door oververzadigde damp voortbewogen achterlieten. In [6] beschrijft Wilson het apparaat waarmee hij hierin geslaagd was, zie figuur 2. Het 'vat', het gevoelige volume, moest niet al te diep zijn om wervelingen bij het expanderen te voorkomen. Een permanent spanningsverschil tussen het venster en de zuiger moest 'achtergrond'-ionen afvoeren. De ionisatiesporen werden verlicht en gefotografeerd (aanvankelijk 'mono', later 'stereo'). Het moment van expansie 'triggerde' op ingenieuze wijze een ontlading (van met een Wimshurstmachine opgeladen Leidse flessen) door kwikdamp waardoor een felle lichtflits de sporen in het nevelvat deed oplichten. De sporen werden vastgelegd op een fotografische plaat.

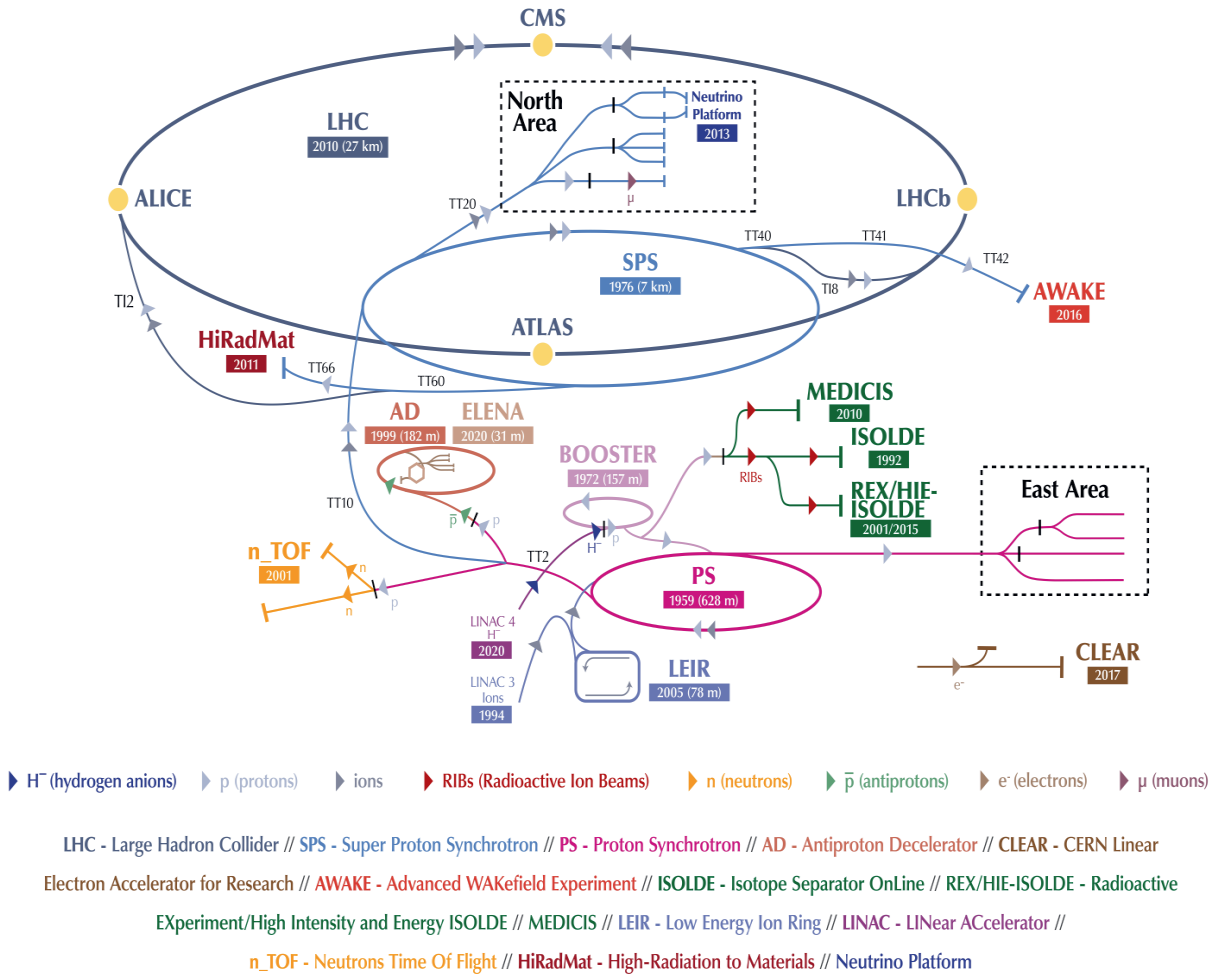
In het bijzonder lukte het hem om sporen van α-deeltjes zichtbaar te maken, afkomstig van het verval van radium. Ook β-stralen, elektronen, afkomstig van radiumverval nam hij waar, alsook de talloze elektronen die door een bundel röntgenstralen vrijgemaakt werden.

Een opmerkelijk wetenschappelijk resultaat was de waarneming van Comptonelektronen: elektronen die bij elastische botsingen met individuele röntgenfotonen vrijkwamen. (Compton deelde de Nobelprijs in 1927 met Wilson.)

Een belangrijke toevoeging aan opstellingen met een nevelvat werd gevormd door elekromagneten die een veld van orde van grootte van 10 - 20 kGauss konden opwekken. Zo kon in een oogopslag de lading van de passerende deeltjes vastgesteld worden en bij meting van de kromtestraal de impuls. In 1932 ontdekte C.D. Anderson in kosmische stralen geregistreerd door een nevelvat in een magneetveld het eerste antideeltje: het postieve elektron, nu positron geheten [7, 8].

Een volgende belangrijke innovatie bij het gebruik van nevelvaten was het gebruik van een 'trigger'. Het is een woord dat in het Nederlands, althans in het jargon van de deeltjesfysica, is ingeburgerd en geen goede vertaling kent. De detectie van kosmische stralen met nevelvaten gebeurde 'op goed geluk': de expansie vond op willekeurige momenten plaats (*at random*). Blackett en Ochialini kwamen op het idee om geiger-müllertellers te gebruiken

Het CERN versnellercomplex



Het versnellercomplex van CERN in schuin bovenaanzicht. Het proton-synchrotron (PS), de eerste protonversneller van CERN, in gebruik genomen in 1959, is nog steeds een onmisbare schakel in dit geheel: als injector voor de LHC, als leverancier van bundels voor *fixed target*-experimenten, als aandrijver van een neutronenbron, als producent van antiprotonen en meer. De figuur illustreert ook de grote diversiteit van het unieke wetenschappelijke programma van CERN, inclusief een faciliteit voor de productie van nieuwe radio-isotopen voor diagnose en therapie in de geneeskunde. (Bij de diverse versnellers is het jaar van ingebruikname en, waar van toepassing, de omtrek aangegeven: voor het PS is die 628 meter en voor de LHC 27 kilometer.)

om een passerende kosmische straal te signaleren en alleen wanneer er zo'n 'trigger' was het nevelvat te laten expanderen en een foto te maken. Het betrof in Blacketts woorden: "*...the devising of a method of making cosmic rays take their own photographs, using the recently developed Geiger-Müller counters as detectors of the rays.*' Aldus registreerden ze kosmische stralen op 80% van de foto's, een enorme verbetering.

Zo konden Anderson en collega's in 1936 [9, 10] tussen de sporen van kosmische stralen het volgende nieuwe deeltje ontdekken: het muon. Daarbij werd gebruikgemaakt van de inmiddels vergaarde kennis omtrent de intensiteit van het ionisatiespoor dat geladen deeltjes achterlieten. Bij gelijke impuls (bij gelijke kromtestraal in het magneetveld) heeft een elektron grotere snelheid dan een proton, het ionisatiespoor van een elektron is dan lichter dan dat van een proton. Anderson en collega's zagen enkele sporen die donkerder waren dan verwacht voor een elektron en lichter dan verwacht voor een proton. De waargenomen ionisatiedichtheid duidde op een massa die tweehonderd keer zo groot was als die van het elektron en dus op een nieuw deeltje, het muon. Ook het feit dat dit deeltje een veel groter doordringend vermogen had dan het elektron paste in het beeld dat het hier om een nog niet bekend 'zwaar elektron' ging.

Voor de volledigheid vermelden we hier ook nog de ontdekking van het K-meson in 1947, ook met behulp van een nevelvat [11].

Het expansie-nevelvat, voor het eerst als spoordetector gepresenteerd door C.T.R. Wilson in 1912 en verder ontwikkeld door onder anderen Blackett heeft een enorme staat van dienst. De hierboven kort opgesomde ontdekkingen zouden nog moeten worden aangevuld met eerste waarnemingen van kernreacties en kosmische '*showers*'. In de jaren vijftig van de vorige eeuw werden expansie-nevelvaten ook gebruikt bij de eerste protonversnellers, zoals het Bevatron in Berkeley.

Intermezzo: fotografische emulsies

Kosmische stralen waren in de periode voorafgaand aan de grote versnellers de door de natuur geleverde hoogenergetische bundels voor ontdekkingen in de deeltjesfysica. Naast de eerder genoemde nevelvaten waren fotografische emulsies de detectoren waarmee deze ontdekkingen werden gedaan. Moest Anderson zijn nevelvat en elektromagneet nog een berg op sjouwen (om kosmische stralen, voor het merendeel protonen, van zo hoog mogelijke intensiteit en energie – zo min mogelijk verstrooid in de aardatmosfeer – te vinden), een fotografische emulsie was compact en licht genoeg om tot een hoogte van dertig kilometer te brengen met een ballon. Zo ontdekten C.F. Powell en medewerkers in 1947 het pi-meson.

Multi-GeV versnellers, het waterstof-bellenvat en verder

De subatomaire fysica kwam pas goed op gang met de ontwikkeling van protonversnellers in de tweede helft van de twintigste eeuw, en met de uitvinding van het bellenvat in dezelfde periode. Berkeley en Brookhaven bouwden de eerste multi-GeV-protonversnellers. Bellenvaten waren een verdere ontwikkeling van nevelvaten: geladen deeltjes trokken sporen van kookbelletjes in oververhitte vloeistof (vaak waterstof). Pionen en kaonen bleken bij lange na niet de enige hadronen: de vele deeltjes die werden ontdekt bleken te passen in een model waarin alle hadronen waren opgebouwd uit drie soorten quarks. Pionachtige deeltjes (mesonen) uit een quark-antiquarkpaar en protonachtige deeltjes (baryonen) uit drie quarks. In Europa nam CERN, opgericht in 1954, het protonsynchrotron in bedrijf in 1959 (met 28 GeV korte tijd wereldrecordhouder). Medio zestiger jaren werd er een groot (2 m) waterstofbellenvat in gebruik genomen.
Op detectorgebied was de uitvinding van de 'dradenkamer' door Charpak een cruciale ontwikkeling die grootschalige detectoren ('spectrometers') mogelijk maakte. Later werden de dradenkamers gecompleteerd met halfgeleiderdetectoren, voorzien van uitleesstrips of pixels, die hogere ruimtelijke resolutie konden halen.
Grotere protonversnellers werden gebouwd, met energieën van honderden GeV's en deze versnellers werden verder ontwikkeld tot 'botsende-bundelmachines'. De vooralsnog ultieme protonbotser is de Large Hadron Collider van CERN met een totale energie van 13 TeV. Gecombineerd met compacte en intense bundels die precies op elkaar botsen was dit toereikend voor de ontdekking van het higgsboson, met een massa van 125 GeV. (Het higgsboson is daarmee overigens niet het zwaarste elementaire deeltje, dat is de topquark met een massa van 175 GeV. De werkzame doorsnede – de kans dat een botsing tussen twee protonen een top-quark oplevert – is echter veel groter dan die voor de productie van een higgsboson. Daarom kon de topquark al in 1995 ontdekt worden bij het Tevatron van Fermilab met botsende proton-antiprotonbundels van ieder 'slechts' 900 GeV).
De geschiedenis vanaf medio jaren vijftig tot en met de ontdekking van het higgsboson beslaat enkele boeiende hoofdstukken over de ontwikkeling van de subatomaire fysica die helaas niet zijn in te passen binnen de ruimte van dit artikel, maar die we zeker zullen schrijven.

Conclusie

We hebben in dit artikel in twee delen geschetst hoe 125 jaar geleden de ontdekking van het elektron en de, toevallig, gelijktijdige uitvinding van het expansie-nevelvat op dezelfde plaats, het Cavendishlaboratorium in Cambridge, aan de basis lagen van de ontwikkeling van een nieuw vakgebied: de subatomaire fysica. Een voorlopig hoogtepunt bereikte dit vakgebied met de ontdekking van het higgsboson bij de LHC van CERN in 2012.

Dankwoord

Ik dank Karel Gaemers en Henk Tiecke voor een aantal discussies en de daaruit voortkomende verbeteringen.

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

1 J. J. Thomson, *XL. Cathode Rays, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **44-269**, 293 - 316 (1897).
2 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).
3 J.J. Thomson, *LV II. On the Charge of Electricity carried by the Ions produced by Röntgen Rays, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **46 - 283**, 528 - 545 (1898).
4 J.J. Thomson *LVIII. On the masses of the ions in Gases at Low Pressures, Phil. Mag. S.* 5 **48-295**, 547 (1899).
5 J.J. Thomson, *XXXIII On the Charge of Electricity carried by a Gaseous Ion, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **5-27**, 346 - 355 (1903).
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**, 277-292 (1912).
7 Carl D. Anderson, *The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives, Science* **76**, 238-239 (1932).
8 Carl D. Anderson, *The Positive Electron, Phys. Rev.* **43**, 491 (1933).
9 Carl D. Anderson en Seth H. Neddermeyer, *Cloud Chamber Observations of Cosmic Rays at 4300 Meters Elevation and Near Sea-Level, Phys. Rev.* **50**, 263 (1936).
10 Seth H. Neddermeyer en Carl. D. Anderson, *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles, Phys. Rev.* **51**, 884 (1937).
11 G.D. Rochester en C. C. Butler, *Evidence for the existence of new unstable elementary particles, Nature* **160** 855-857 (1947).