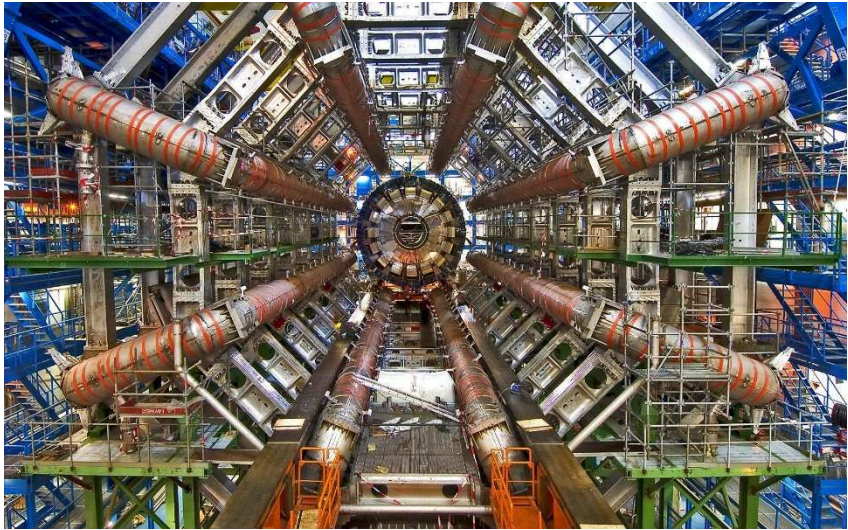


Hart van de materie

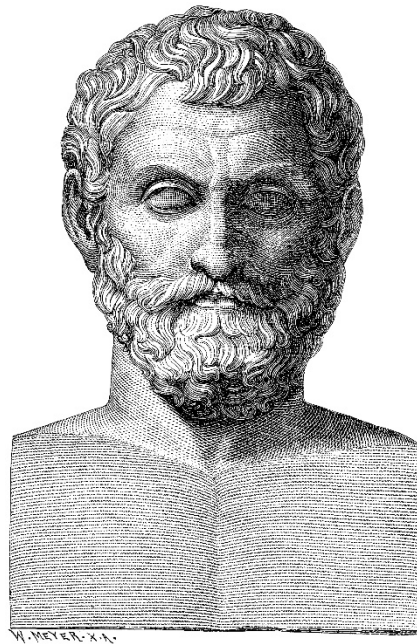
Figuren in kleur

Dr. Geert Potters

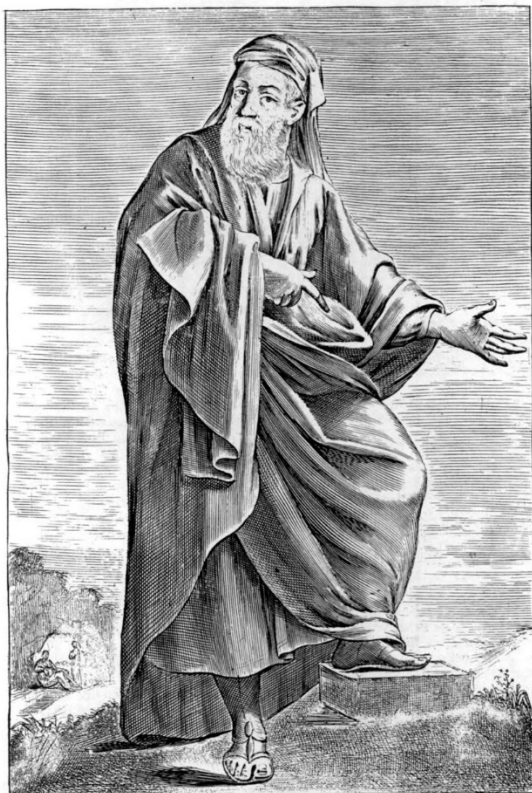
Copyright © 2018 Geert Potters
Creative Commons BY-SA 4.0
of zoals aangegeven bij de figuren.
ISBN-10: 1725542625
ISBN-13: 978-1725542624



Figuur 1. De Large Hadron Collider in het CERN.



Figuur 2. Thales van Milete



Figuur 3. Empedocles

Grieks wijsgeer uit Acragas (Agrigentum) te Sicilië. Over zijn dood bestaan verschillende legenden. Zo zou de man volgens Diogenes Laertius zelfmoord hebben gepleegd door in de Etna-vulkaan te springen. Hij zou hiermee willen bewijzen dat hij onsterfelijk was. Dit werd later gepersifleerd in een satire van Lucianus van Samosata, waar de filosoof door een uitbarsting van de Etna naar de maan werd geslingerd.



Figuur 4. Democritus van Abdera

Democritus werd geboren in Abdera (Griekenland) in 460 v. Chr. Hij werd 90 jaar oud. Hij studeerde natuurkunde en meetkunde in Thracië, Athene en Abdera. Democritus maakte grote reizen naar verre landen, waaronder India, Egypte en Babylon. Hij was nooit getrouwd.

(1)



T. LUCRETII CARI
DE
RERUM NATURA
Liber Primus.



ENEADUM genetrix, hominum di-
vumque voluptas,
Alma Venus, coeli subter labentia
signa
Quæ mare navigerum, quæ terras fru-
giferenteis.

Concelebras : per te quoniam genus omne animantium
Concipitur, vixitque exortum lumina solis :
Te, Dea, te fugiunt venti, te nubila coeli,
Adventumque tuum : tibi suaveis dædala tellus
Summittit flores, tibi rident æquora ponti,
Placatumque nitet diffuso lumine coelum.
Nam simul ac species patefacta 'st verna diei,
Et reserata viget genitabilis aura Favoni :
Aeris primum volucres te, diva, tuumque
Significant initum percussæ corda tua vi.
Inde feræ pecudes persultant pabula læta,
Et rapidos tranant amneis : ita capta lepore,
Illecebrisque tuis omnis natura animantium

B

Te

Figuur 5. De Rerum Natura van Lucretius.

Eerste verzen van het monumentale leergedicht zoals uitgegeven door Tanaquil
Faber in 1675.



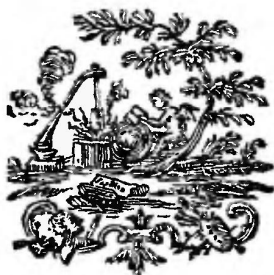
Figuur 6. Robert Boyle

TRAITÉ
ÉLÉMENTAIRE
DE CHIMIE,
PRÉSENTÉ DANS UN ORDRE NOUVEAU
ET D'APRÈS LES DÉCOUVERTES MODERNES;

Avec Figures :

Par M. LAVOISIER, de l'Académie des Sciences, de la Société Royale de Médecine, des Sociétés d'Agriculture de Paris & d'Orléans, de la Société Royale de Londres, de l'Institut de Bologne, de la Société Helvétique de Basle, de celles de Philadelphie, Harlem, Manchester, Padoue, &c.

TOME PREMIER.



A PARIS,

Chez CUCHET, Libraire, rue & hôtel Serpente.

M. DCC LXXXIX.

Sous le Privilège de l'Académie des Sciences & de la Société Royale de Médecine.

Figuur 7. Voorpagina van het boek *Traité Élémentaire de Chimie*.

Voorpagina van Lavoisiers *Traité Élémentaire de Chimie* uit 1789 wordt gezien als de eerste handleiding tot de moderne scheikunde.

	Noms nouveaux.	Noms anciens correspondans.
<i>Substances simples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les élémens des corps.</i>	Lumière.....	Lumière. Chaleur. Principe de la chaleur.
	Calorique:.....	Fluide igné. Feu. Matière du feu & de la chaleur.
	Oxygène.....	Air déphlogistiqué. Air empiréal. Air vital. Base de l'air vital.
	Azote.....	Gaz phlogistiqué. Mofete. Base de la mofete.
	Hydrogène.....	Gaz inflammable. Base du gaz inflammable;
	Soufre.....	Soufre.
	Phosphore.....	Phosphore.
<i>Substances simples non métalliques oxidables & acidifiables.</i>	Carbone.....	Charbon pur;
	Radical muriatique.	Inconnu.
	Radical fluorique..	Inconnu.
	Radical boracique..	Inconnu.
	Antimoine.....	Antimoine;
	Argent.....	Argent.
	Arsenic.....	Arsenic.
<i>Substances simples métalliques oxidables & acidifiables.</i>	Bismuth.....	Bismuth.
	Cobalt.....	Cobalt.
	Cuivre.....	Cuivre.
	Étain.....	Étain.
	Fer.....	Fer.
	Manganèse.....	Manganèse.
	Mercure.....	Mercure.
	Molybdène.....	Molybdène.
	Nickel.....	Nickel.
	Or.....	Or.
	Platine.....	Platine.
	Plomb.....	Plomb.
	Tungstène.....	Tungstène.
<i>Substances simples solubles & terreuses.</i>	Zinc.....	Zinc.
	Chaux.....	Terre calcaire, chaux;
	Magnésie.....	Magnésie, base du sel d'Épſom.
	Baryte.....	Barote, terre pesante.
	Alumine.....	Argile, terre de l'alun, base de l'alun.
	Silice.....	Terre siliceuse, terre vitrifiable.

Figuur 8. Indeling van de elementen volgens Lavoisier.



Figuur 9. Portret van Lavoisier en zijn echtgenote, scheikundige Marie-Anne Pierrette Paulze.

Offre des 28 février 1794
Lavoisier

Procès-verbal
d'exécution de
mort.

L'an *premier* de la République Française, le *22*
Mars à la requête du citoyen Accusateur-public
près le Tribunal Révolutionnaire, établi au Palais, à Paris,
par la loi du 10 Mars 1793, sans aucun recours au Tribunal de
cassation, lequel fait élection au Greffe dudit Tribunal séant
au Palais, je me suis _____ Huissier-
audancier audit Tribunal, soussigné, transporté en la maison-
de-Justice dudit Tribunal, pour l'exécution du Jugement rendu
par le Tribunal *Cejourdhuy* contre *Lavoisier*
qui le condamne



à la peine de mort, pour les causes énoncées audit jugement,
et de suite je l'ai remis à l'exécuteur des jugemens criminels,
et à la Gendarmerie qui *Lui* conduit sur la place
de *la Nation* où, sur un échaffaud dressé sur ladite place,
l'*ad Lavoisier*, en notre présence, subi la peine de
mort, et de tout ce que dessus a été et rédigé le présent procès-
verbal, pour servir et valoir ce que de raison, dont acte.

Enregistré gratis, à Paris, le *22* *Mars* l'an deuxième
de la République, une et indivisible.

(Signature)
Lucy

Figuur 10. Doodvonnis van Lavoisier.

Lavoisier vulde zijn dagen niet enkel met scheikunde, maar ook met het innen van de belastingen voor de Franse koning, en dat was uiteindelijk zijn ondergang. Als een van de 28 vooraanstaande belastinginners van het Ancien Régime werd Lavoisier gezien als een vijand van de Franse revolutie. De vijandige sfeer tegen hem werd nog verder opgestookt door beschuldigingen van Jean-Paul Marat. In 1794 werd hij op 50-jarige leeftijd onder de guillotine ter dood gebracht.



Figuur 11. Joseph Proust

Proust kwam niet alleen met zijn wet voor de dag, maar hij was ook in staat om te bewijzen dat de suiker in druiven dezelfde is als de suiker in honing (in beide gevallen gaat het over glucose en niet over sucrose).



Figuur 12. Rozetten van diepblauw azuriet op een bed van malachiet, uit China.

Basisch kopercarbonaat is een koper(II) carbonaat hydroxide. Het is een ionische verbinding (een zout), bestaande uit de ionen koper(II) (Cu^{2+}), carbonaat (CO_3^{2-}) en hydroxide (OH^-).

Van deze verbinding bestaan twee varianten. De eerste heeft als brutoformule $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$. Het is een groene kristallijne vaste stof die in de natuur voorkomt als het mineraal malachiet. De tweede heeft als brutoformule $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, een blauwe kristallijne vaste stof, bekend als het mineraal azuriet. Beide varianten komen ook voor in de koperoxidelagen op verweerde messing, brons en koper.

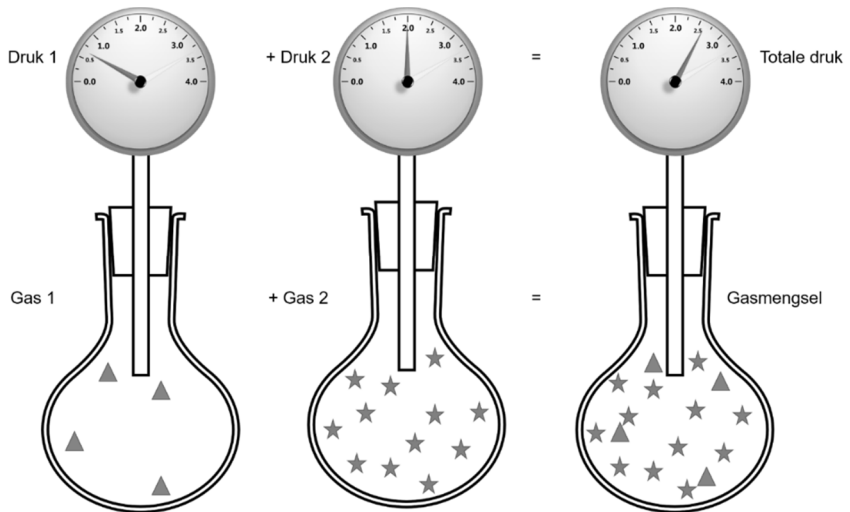
Azuriet en malachiet waren twee van de zeven mineralen die ten tijde van de Egyptenaren in verfmengsels werden gebruikt, respectievelijk als blauw en groen pigment.

Basisch koper(II)carbonaat wordt door verdund zoutzuur ontleed in het zout koper(II)chloride (CuCl_2) en koolstofdioxide (CO_2). Bij verhitting valt het uiteen tot CO_2 en CuO , koper(II)oxide. Het is deze laatste reactie die Proust gebruikte om aan te tonen dat koper(II)carbonaat steeds uit dezelfde hoeveelheden aan samenstellende stoffen bestaat. Ook de minerale varianten malachiet en azuriet vormen bij decompositie CO_2 en CuO .



Figuur 13. John Dalton.

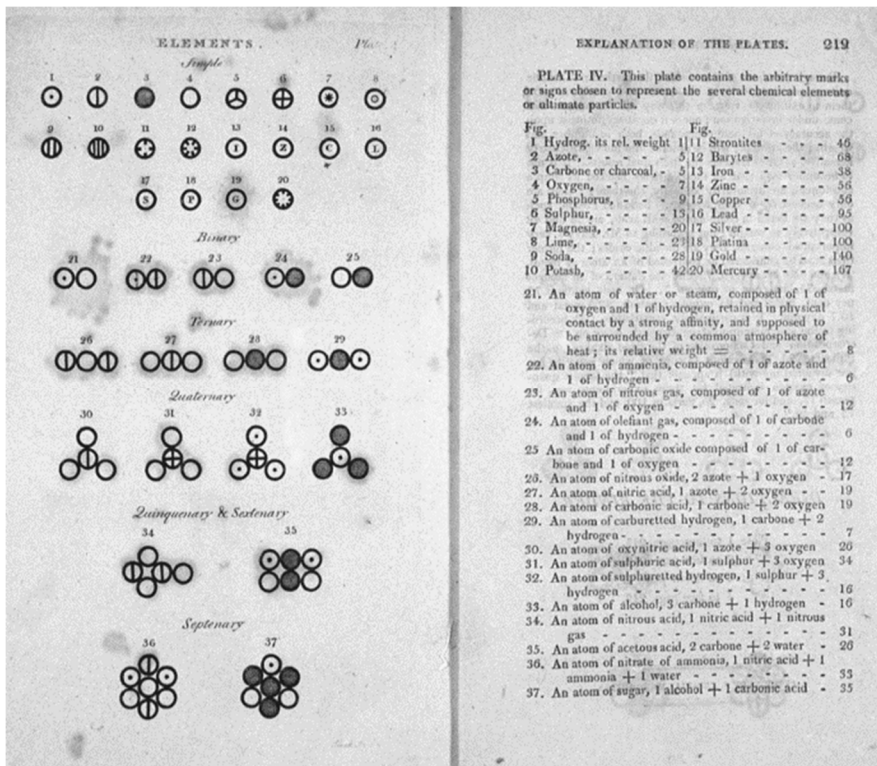
*John Dalton werd geboren in 1766 in Eaglesfield, een klein dorpje in het noorden van Engeland. Net als Priestley en Faraday behoorde hij tot de geloofsgemeenschap van de Quakers. Hij leerde op eigen houtje wat hij kon vinden over wetenschappen en wiskunde en begon al op jonge leeftijd anderen te onderwijzen met de opgedane kennis. Heel zijn leven lang bleef Dalton leren en studeren. Vanaf 24 maart 1787 hield hij bijvoorbeeld een weerkundig dagboek bij, dat hij tot op zijn sterfbed bleef aanvullen. Die dagelijkse observaties waren meteen de basis voor zijn eerste boek, *Meteorological Observations and Essays* (1793). Zijn eerste echte wetenschappelijke paper beschreef overigens een aandoening waar hij zelf aan leed: rood-groenkleurenblindheid, naar hem daltonisme genoemd.*



Figuur 14. De gaswet van Dalton.

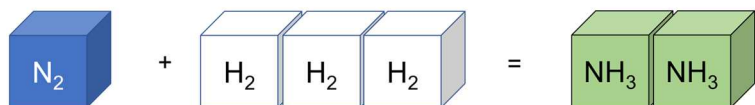
Tussen 1795 en 1805 werkte hij aan zijn belangrijkste verwezenlijkingen: de atoomtheorie en zijn gaswet (de wet van de partieeldrukken, oftewel "de totale druk van een mengsel van gassen is gelijk aan de som van de drukken die de gassen zouden uitoefenen als ze alleen zouden voorkomen").

Erkenning voor zijn werk kreeg Dalton pas op latere leeftijd. In 1822 werd hij lid van de Royal Society, in 1826 kreeg hij zijn eerste Royal Medal, en in 1833 kende Groot-Brittannië hem een staatspensioen toe. Hij stierf op 27 juli 1844. 40 000 mensen woonden zijn begrafenis bij.



Figuur 15. De atoomsymbolen van Dalton.

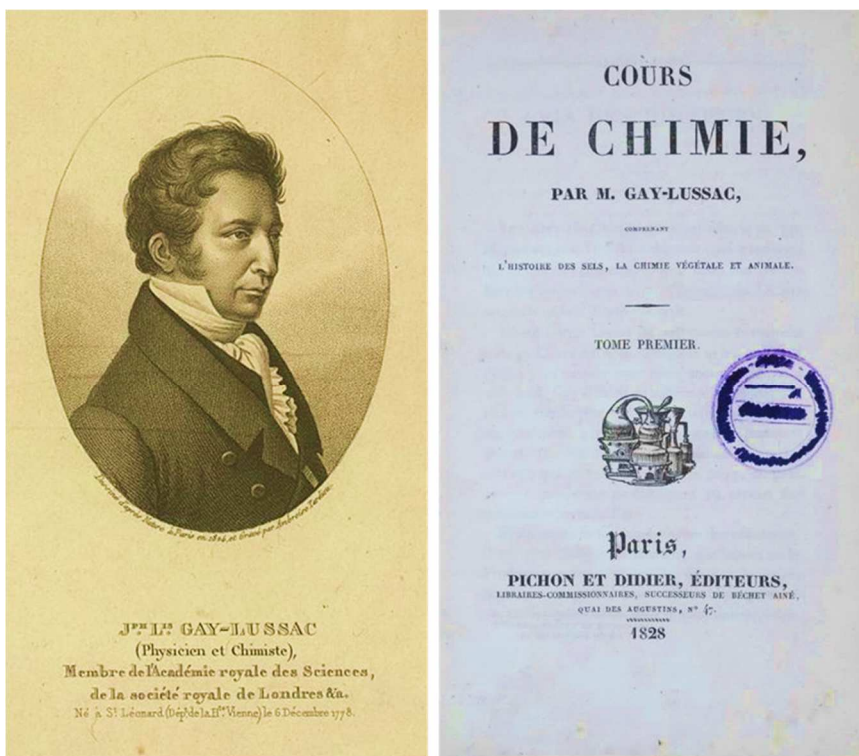
John Dalton ontwikkelde ook een eigen systeem om de elementen en de atomen in verbindingen symbolisch voor te stellen. Enkele jaren later zou Berzelius voor de dag komen met het systeem dat we vandaag nog steeds hanteren.



Figuur 16. Voorbeelden van de wet van gecombineerde volumes



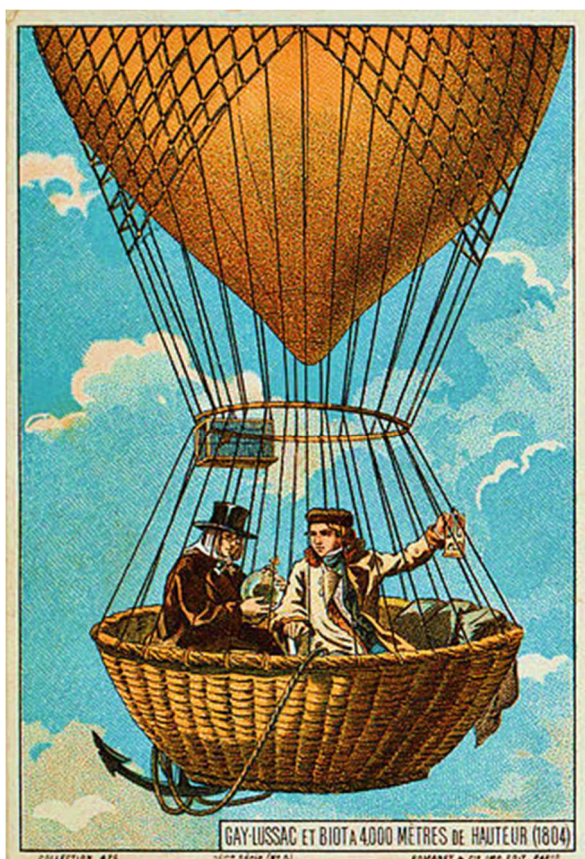
Figuur 17. Buret, ontwikkeld door Louis Gay-Lussac.



Figuur 18. Gay-Lussac en zijn handboek Chemie

Louis Joseph Gay-Lussac (Saint-Léonard-de-Noblat, 6 december 1778 – Parijs, 9 mei 1850) was een Frans scheikundige en natuurkundige. Hij werd in 1808 hoogleraar in de natuurkunde aan de Sorbonne, in 1809 hoogleraar scheikunde aan de École Polytechnique te Parijs en in 1832 werd hij hoogleraar in de scheikunde aan de Jardin des Plantes.

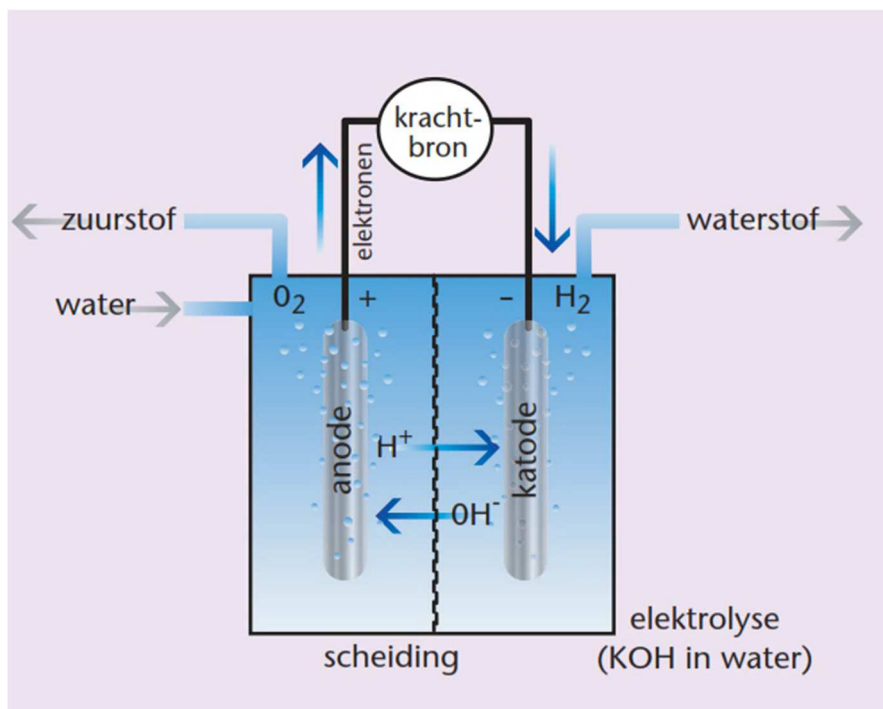
Samen met Louis-Jacques Thénard (1777-1857), zijn collega aan de École Polytechnique, onderzocht Gay-Lussac elektrochemische methoden om de zeer reactieve metalen natrium en kalium te isoleren in hun metallische vorm. Hij ontdekte het element boor, en deed onderzoek naar de scheikundige opbouw van binaire zuren (zuren die zoals zoutzuur bestaan uit twee elementen). Hij onderzocht de eigenschappen van een nieuwe stof, ontdekt door Bernard Courtois, en bevestigde daarbij dat het over een nieuw element ging, nl. jodium.



Figuur 19. Gay-Lussac en Biot analyseren de atmosfeer

In 1804 steeg Gay-Lussac meerdere keren in met waterstof gevulde ballonnen tot een hoogte van meer dan 7.000 meter boven de zeespiegel om andere aspecten van gassen te onderzoeken. Hij deed metingen van magnetische velden, druk, temperatuur en vochtigheid op verschillende hoogten, en nam verschillende luchtmonsters die hij in het laboratorium verder analyseerde.

Ook later in zijn leven bleef Gay-Lussac zeer actief. Hij ontwikkelde een nauwkeurige methode voor het analyseren van het alcoholgehalte van sterke dranken en verwierf een patent voor een nieuwe methode voor het produceren van zwavelzuur.



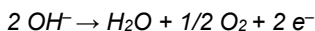
Figuur 20. Elektrolyse van water

De proef is u wellicht bekend: we leggen een gelijkstroom aan in een vat water waaraan een elektrolyt is toegevoegd (zoals KOH, om de geleiding van de stroom optimaal te laten verlopen), en we zorgen ervoor dat elke elektrode in een apart (maar wel onderling verbonden) compartiment ondergedompeld wordt. Vrij snel zie je bubbels opkomen, aan elk van beide elektroden. Als je het ene gas opvangt in een proefbuisje en er een brandende lucifer bijhoudt, ontploft het (dat wijst op de aanwezigheid van waterstofgas); het andere gas doet een gloeiende houtspaander feller opglowen (en dat is dan zuurstof).

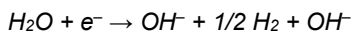
Het toestel (het Hofmanntoestel) dat daarvoor vaak gebruikt wordt, staat links in de figuur. De reactie staat rechts op het schema.

Het verloop van de elektrolyse kunnen we als volgt verklaren. In de oplossing zijn vooral watermoleculen, kaliumkationen (K^+) en hydroxide-anionen (OH^-) aanwezig.

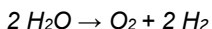
De K^+ -ionen blijven ongewijzigd, maar aan de anode worden hydroxide-ionen geoxideerd:



Aan de kathode worden watermoleculen gereduceerd:



De som van beide reacties is de elektrolytische splitsing van water:



Meer weten over de gassen die samen reageren tot water? In onderstaande video wordt elektrolyse van water getoond (het splitsen van water in waterstofgas en zuurstofgas met behulp van elektrische stroom). Dit klassieke experiment toont dat water kan gesplitst worden in een volume zuurstofgas en twee maal datzelfde volume waterstofgas.

<https://www.youtube.com/watch?v=0X604USY6hs>



Figuur 21. Avogadro

Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregna e Cerreto werd geboren te Turijn op 9 augustus 1776 en overleed er bijna tachtig jaar later, op 9 juli 1856.

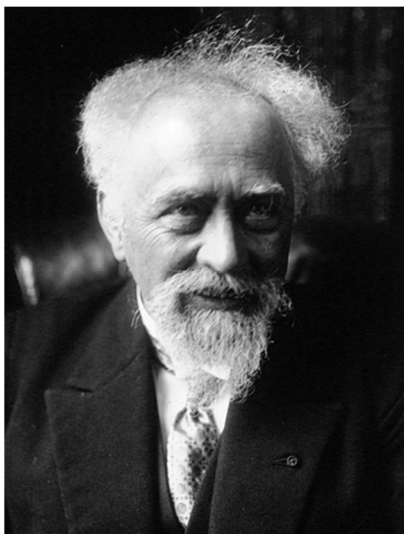


Figuur 22. Gaylussacia baccata

Bij wijze van uitsmijter: ter ere van Gay-Lussac werd een genus van de heidefamilie (Ericaceae) naar hem genoemd: Gaylussacia, een endemische groep uit Noord- en Zuid-Amerika. In het Engels heten deze planten huckleberry of dangleberry.



Figuur 23. Johan Joseph Loschmidt (links) en Karoly Than (rechts)



Figuur 24. Wilhem Ostwald (links) en Jean Perrin (rechts)

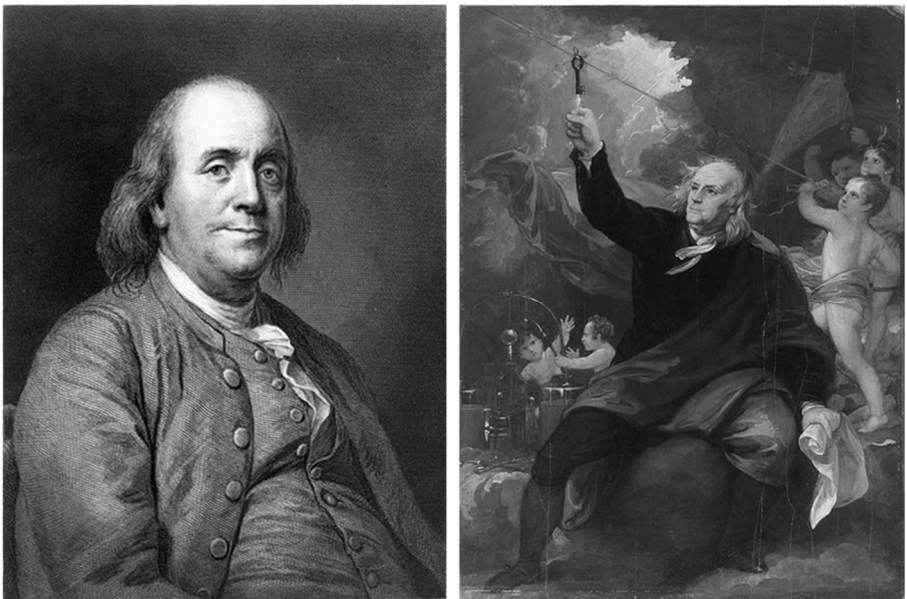
Jaar	Onderzoeker	Methode	Waarde ($\times 10^{23}$)
1865	Loschmidt	Gasttheorie	72
1873	Van der Waals	Gasttheorie	11
1890	Röntgen	Atomaire film op water	7
1890	Rayleigh	Atomaire film op water	6,08
1901	Planck	Theorie ($N_A = R/k_B$)	6,16
1903	Wilson	Oliedruppelmethode	9,3
1904	JJ Thomson	Oliedruppelmethode	8,7
1908	Einstein	Diffusietheorie	6
1908	Perrin	Brownse beweging	6,7
1909	Rutherford	Theorie alfadeeltjes	6,16
1914	Fletcher	Brownse beweging	6,0
1914	Nordlund	Diffusie in vloeistof	5,91
1915	Westgreen	Diffusie in vloeistof	6,06
1917	Millikan	Oliedruppelmethode	6,064
1923	Shaxby	Diffusie in vloeistof	5,9
1924	Du Nouy	Dunne films	6,004
1929	Birge	X-straaldiffractie	6,0644
1931	Bearden	X-straaldiffractie	6,019
1941	Birge	Calciet, NaCl, KCl	6,022 83
1945	Birge	Diamant, LiF	6,023 38
1949	Straumanis	Calcietkristallen	6,024 03
1965	Bearden	X-straal kristaldensiteit	6,022 088
1974	Deslattes	X-straal kristaldensiteit	6,022 094 3
1992	Seyfried	X-straal kristaldensiteit	6,022 136 3
1994	Basile	X-straal kristaldensiteit	6,022 137 9
1995	De Bièvre	X-straal kristaldensiteit	6,022 136 5
1999	Fuji	X-straal kristaldensiteit	6,022 155 0
2001	De Bièvre	X-straal kristaldensiteit	6,022 133 9

Figuur 25. Het getal van Avogadro

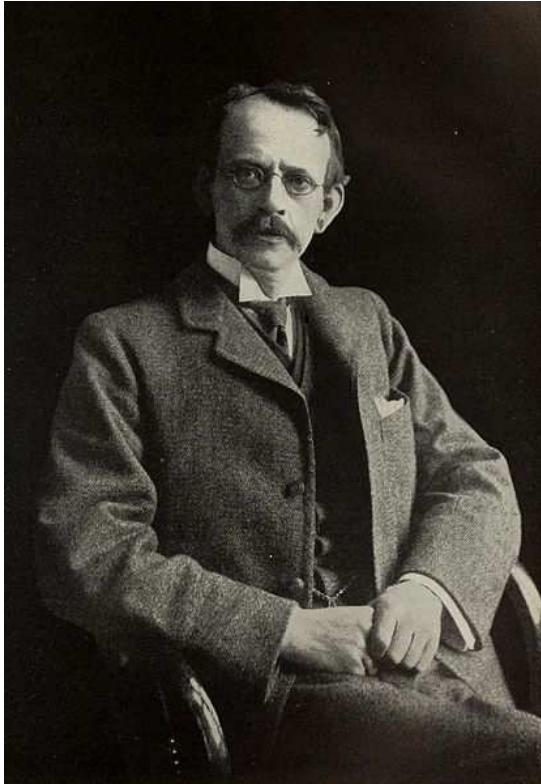
Hoe de waarde van het getal van Avogadro door de jaren heen steeds nauwkeuriger bepaald werd, en met steeds nieuwere methoden.



*Figuur 26. William Gilbert (1544–1603, links),
Otto von Guericke (midden) en
Charles François de Cisternay du Fay (1698-1739, rechts)*

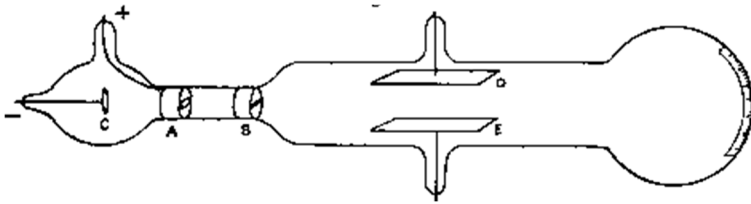


Figuur 27. Benjamin Franklin



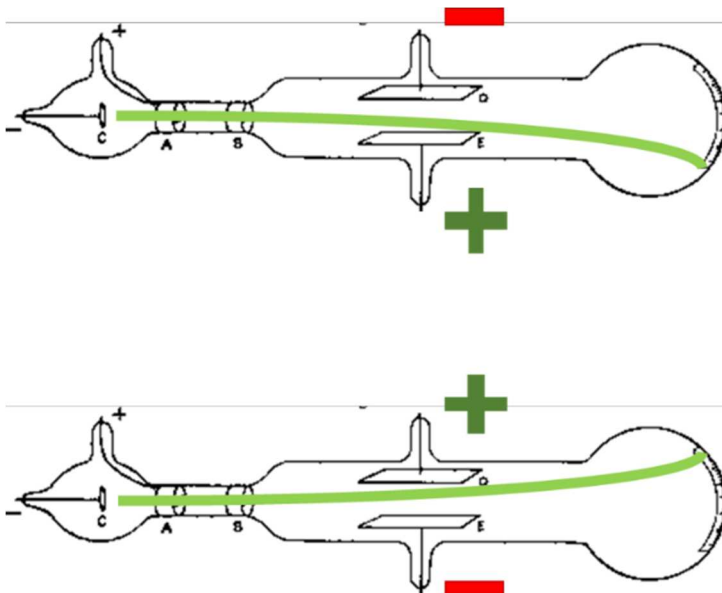
Figuur 28. J.J. Thomson

Joseph John Thomson (Manchester, 18 december 1856 – Cambridge, 30 augustus 1940), de ontdekker van het elektron. Hij won de Nobelprijs voor Natuurkunde in 1906, "voor zijn theoretisch en experimenteel onderzoek naar de geleiding van elektriciteit door gassen".

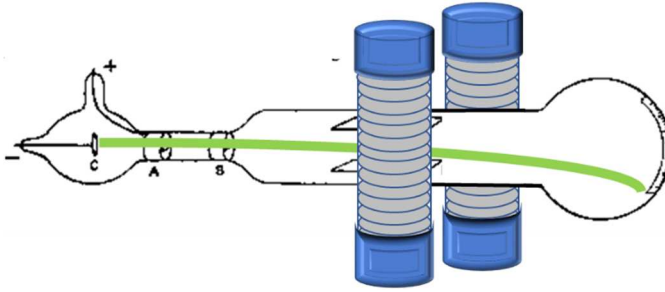


Figuur 29. De kathodestraalbuis waarmee Thomson zijn experimenten uitvoerde.

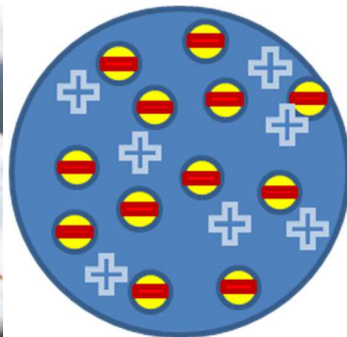
C is de kathode, A de anode (met een opening in het midden). Wanneer een (hoge) elektrische spanning wordt aangelegd tussen A en C, vormt er zich een straal die eerst doorheen de anode gaat, en dan doorheen een geaarde metalen ring (B) passeert. Vervolgens gaat deze straal tussen twee platen uit aluminium (D en E). Daarna botst deze straal aan het rechteruiteinde op een oppervlak, bedekt met een fosforescerende substantie, zodat het duidelijk is waar de straal op het oppervlak botst.



Normaal gesproken gaat de straal rechtdoor. Wanneer er echter een elektrisch veld wordt aangelegd tussen de platen D en E, zal dit veld de straal doen uitwijken, weg van de negatieve pool. De uitwijking zelf is evenredig met de sterkte van het elektrisch veld.

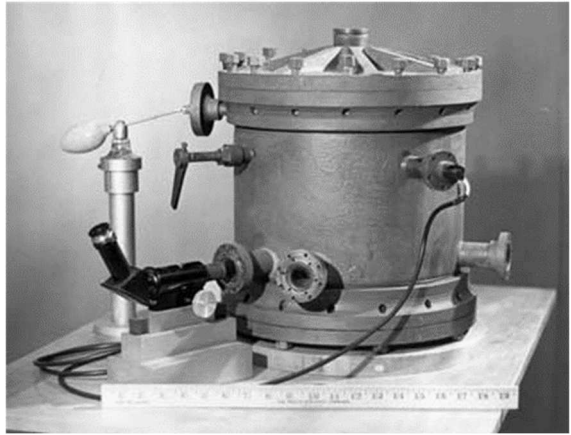


Hetzelfde gebeurt echter ook wanneer we de straal in een magnetisch veld plaatsen. De straal buigt af, loodrecht op de magnetische veldlijnen. Dit verschijnsel gebeurt onder invloed van een kracht, die we de lorentzkracht noemen.



Figuur 30. Van plumpudding tot atoommodel.

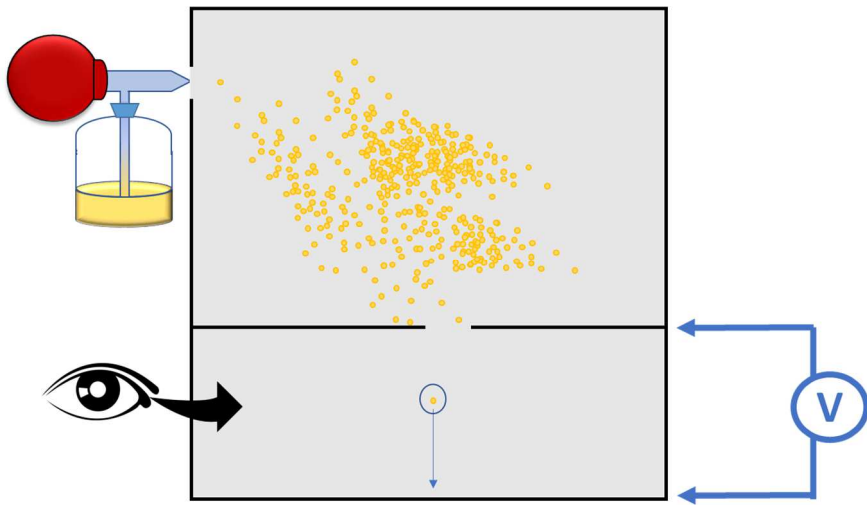
Links, de traditionele Engelse plumpudding (een kerstdessert). Rechts, het atoommodel volgens Thomson, voorgesteld in 1900.



Figuur 31. Robert Millikan

Links: Robert Andrews Millikan (22 maart 1868 – 19 december 1953), Nobelprijswinnaar voor Natuurkunde uit 1923. Hoewel hij een bachelordiploma in klassieke letteren had behaald, daagde zijn docent Grieks hem uit om een inleidende cursus natuurkunde te geven. Dit beviel hem zo erg, dat hij zijn leven lang is blijven bijdragen aan populaire teksten en inleidende cursussen rond wetenschappen.

Rechts: De originele opstelling waarmee Millikan in 1909–1910 zijn oliedruppelexperimenten uitvoerde.



Figuur 32. Werking van de oliedruppelkamer van Millikan.

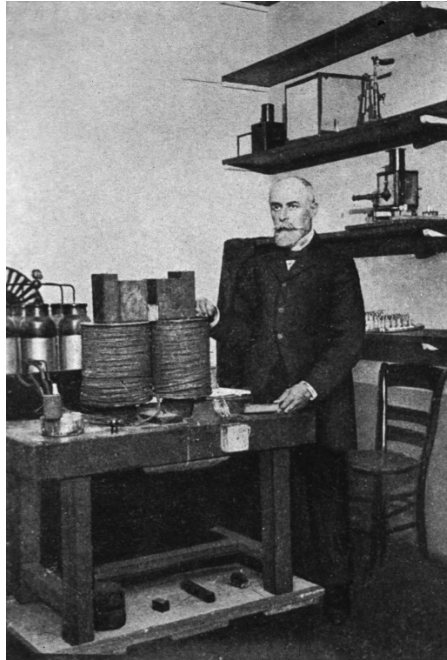
Met behulp van een verstuiver bracht Millikan een fijne nevel van oliedruppeltjes in de kamer. Sommige van deze kleine druppeltjes vielen door een gat in het bovenste niveau. Millikan liet ze eerst vallen tot ze een constante snelheid bereikt hadden. Met een microscoop in de zijwand van het toestel mat hij eerst de eindsnelheid en berekende op basis daarvan de massa van elke oliedruppel. Vervolgens bracht hij een lading op de vallende druppels door de onderste kamer te bestralen met röntgenstralen. Dit ioniseerde de lucht in die kamer, zodat één of meer vrije elektronen zich hechtten aan de oliedruppels. Bovendien gebruikte hij de boven- en onderwand van die onderste kamer om een elektrisch veld aan te leggen, net sterk genoeg om de val van de druppels te stoppen (die dan bleven zweven in mid-air). Uit de sterkte van het elektrisch veld op dat moment, kon hij dan de lading van de druppels en dus de lading van een elektron berekenen.



Figuur 33. Fluorescentie en fosforescentie.

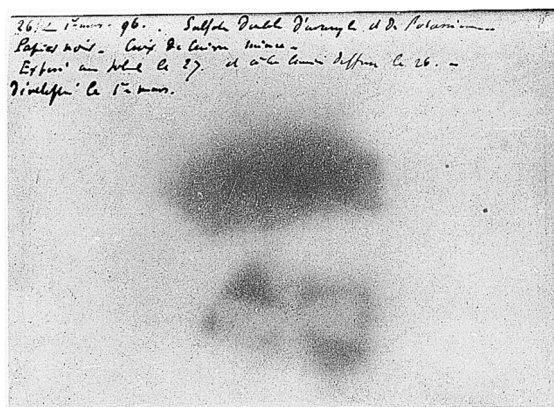
Links: Fluorescerende koralen (Underwater Observatory Marine Park, Eilat). Rechts: Fosforescente wijzerplaat (die nog verlicht blijft nadat het donker geworden is). Fluorescente stoffen absorberen elektromagnetische straling (licht, X-stralen, gammastralen) en zenden de energie ervan onmiddellijk terug uit bij een langere golflengte (zodat de kleur verandert).

Fosforescente stoffen doen hetzelfde, maar stralen de opgenomen energie over een langere tijd bij een lagere sterkte terug uit (denk aan het “glow in the dark”-fenomeen). Tenminste, dat is de eenvoudige verklaring. Een diepgaandere uitleg van deze processen vereist een goed begrip van de kwantummechanica en daar zijn we in ons verhaal hier nog ver af. Een ander voorbeeld van fosforescentie vinden we terug in kristallen van zinksulfide (ZnS) – een voorbeeld dat nog van pas komt in verdere episodes van ons verhaal. Wanneer dergelijke kristallen kleine hoeveelheden ionen van transitielementen (zoals Mn^{2+} , Cu^{2+} of Ag^+) bevatten, kunnen deze kristallen fosforescerend licht uitzenden. Zo zal de aanwezigheid van zilverionen zorgen voor blauw licht en de aanwezigheid van koperionen voor groen licht.

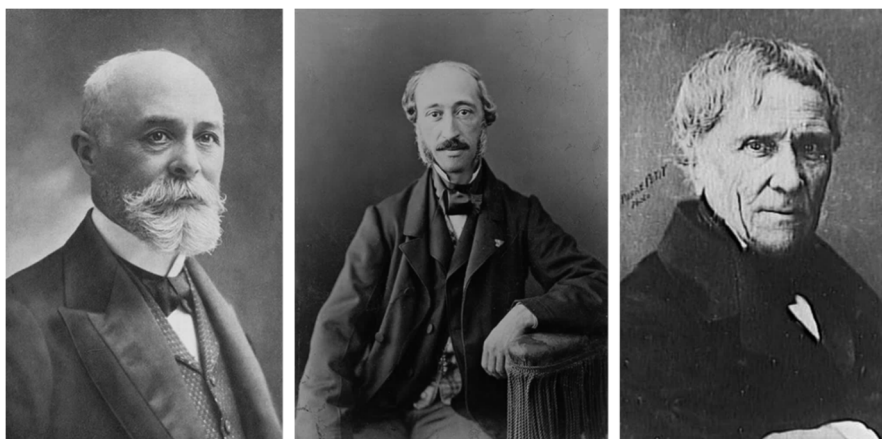


Figuur 34. Henri Becquerel

Antoine Henri Becquerel (15 december 1852, Parijs, Frankrijk - 25 augustus 1908, Le Croisic, Bretagne, Frankrijk), hier te zien in zijn laboratorium. Voor zijn ontdekking van radioactiviteit kreeg Becquerel de helft van de Nobelprijs voor Natuurkunde in 1903. De andere helft van de prijs was bestemd voor Pierre en Marie Curie voor hun studie van de Becquerel-straling.

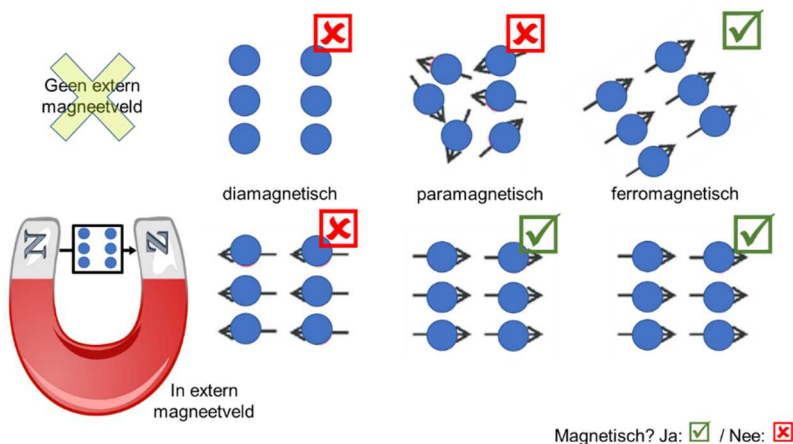


Figuur 35. Schaduwen van radioactief uranium op een fotografische plaat.



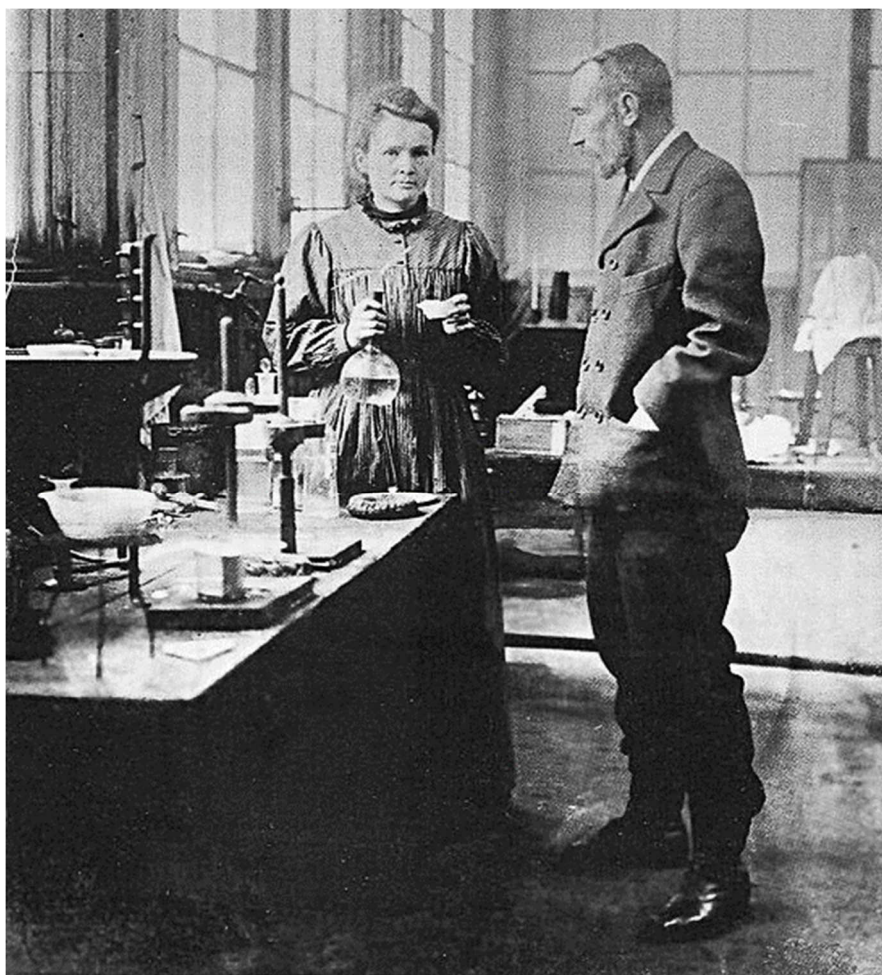
Figuur 36. De wetenschappelijke stamboom van de Becquerels.

Henri (links) stamde af van een lange stamboom van wetenschappers. Zijn vader, Alexander Edmond Becquerel (1820-1891, midden) had het fotovoltaisch effect voor het eerst waargenomen (het principe waar we nu zonnecellen door laten werken). Grootvader Antoine César (rechts) had de differentiële galvanometer uitgevonden en ook een elektrolytische methode voor de extractie van metalen uit ertsen, met behulp van zwavel. Henri's zoon Jean (1878-1953, niet op de foto), ten slotte, is meteen de vierde op rij die de leerstoel natuurkunde bekleedde aan het Muséum National d'Histoire Naturelle te Parijs.



Figuur 37. Magnetische eigenschappen.

Materialen die onder invloed van een extern magneetveld zelf niet magnetisch worden (of zwak magnetisch, tegengesteld aan dat externe veld), noemen we diamagnetisch. Materialen die onder invloed van zo een veld zelf sterk magnetisch worden, zijn paramagnetisch. Wanneer een materiaal al van zichzelf magnetische eigenschappen heeft (of deze behoudt na magnetisatie door een extern veld), noemen we het ferromagnetisch.



Figuur 38. Pierre en Marie Curie in hun laboratorium, uit 1900.

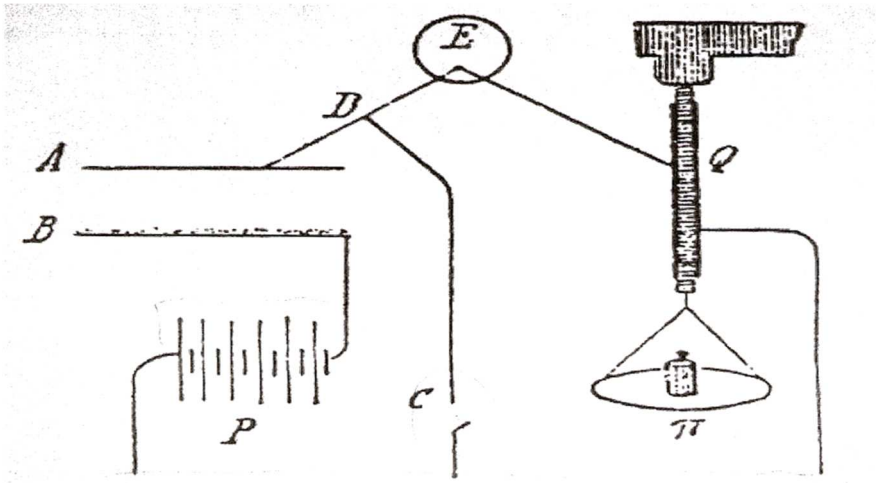


Figuur 39. Apparatuur van Pierre en Marie Curie.

Links: Piëzo-elektrische apparatuur, gebouwd door Pierre Curie rond 1889. Dit apparaat is een van twee oorspronkelijke piëzo-machines die de Curies gebruikten bij de ontdekking van radium en polonium. Het is de directe voorloper van de moderne dosimeter en als dusdanig een van de eerste instrumenten om radioactiviteit te meten. In de koperen bak zit er een dun stukje kwartskristal, geklemd tussen twee stangen. Dit kristal torst een kleine pan. Wanneer er gewichten worden toegevoegd aan de pan, wordt het kristal mechanisch belast en produceert dan een kleine elektrische lading.

Pierre kende dit fenomeen, het piëzo-elektrisch effect, zeer goed – zoals in de tekst vermeld had hij dit samen met zijn broer ontdekt. Hoewel de geproduceerde lading klein is - in de pico-ampère-range – hielp het de Curies om nauwkeurig de activiteit van radioactief materiaal te meten. Enerzijds maten ze de elektrische lading in een condensator, gekoppeld aan één kant van de elektrometer, anderzijds wekten ze een tegenstroom op door het piëzo-elektrisch kristal te belasten, door gewichten te plaatsen op de weegpan. Hierbij pasten ze de gewichten aan, tot beide elektrische stromen gelijk waren. Een wiskundige vergelijking maakte het mogelijk om uit het totale gewicht de totale radioactiviteit te berekenen.

Rechts: Quadrant-elektrometer, gebouwd door Pierre Curie.

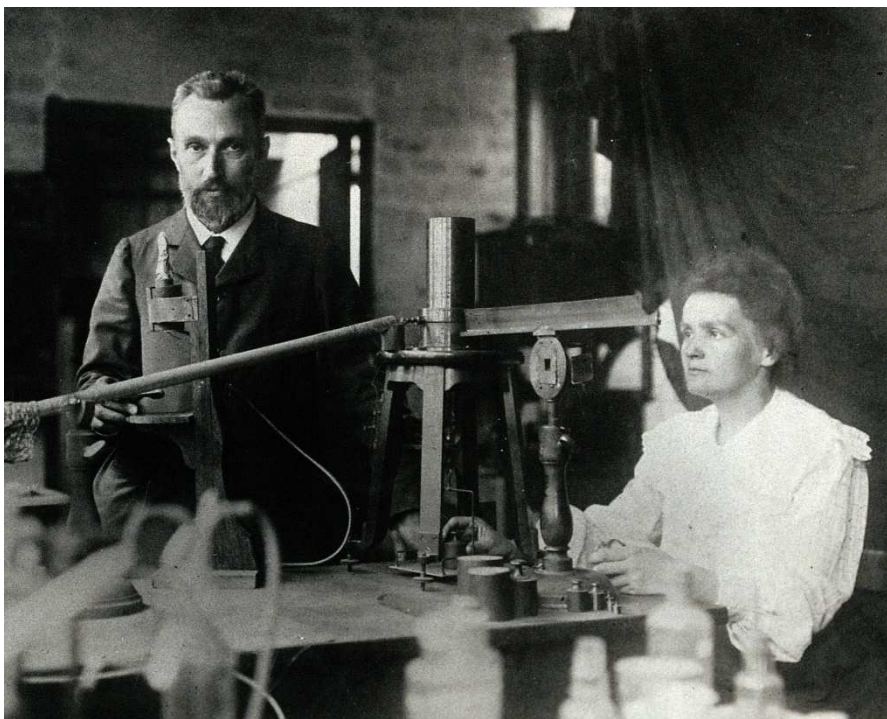


Figuur 40. Schematische weergave van de opstelling van de Curies.

Deze tekening (gemaakt door Marie Curie zelf voor een lezing aan de Sorbonne in 1904) legt uit hoe de experimentele opstelling eruitzag, die de Curies gebruikten tijdens hun onderzoek naar de straling van uraniumertsen. A, B: Plaatcondensator, die tevens diende als ionisatiekast. - C Schakelaar - E Elektrometer - H Weegschaal - P Batterij - Q Piëzoelektrisch kwarts.



Figuur 41. Uraniniet, uit Tsjechië.



Figuur 42. Marie Curie achter de elektroscop, Pierre Curie kijkt toe.



*Figuur 43. Zicht op de Rue Dauphine
aan het begin van de twintigste eeuw.*

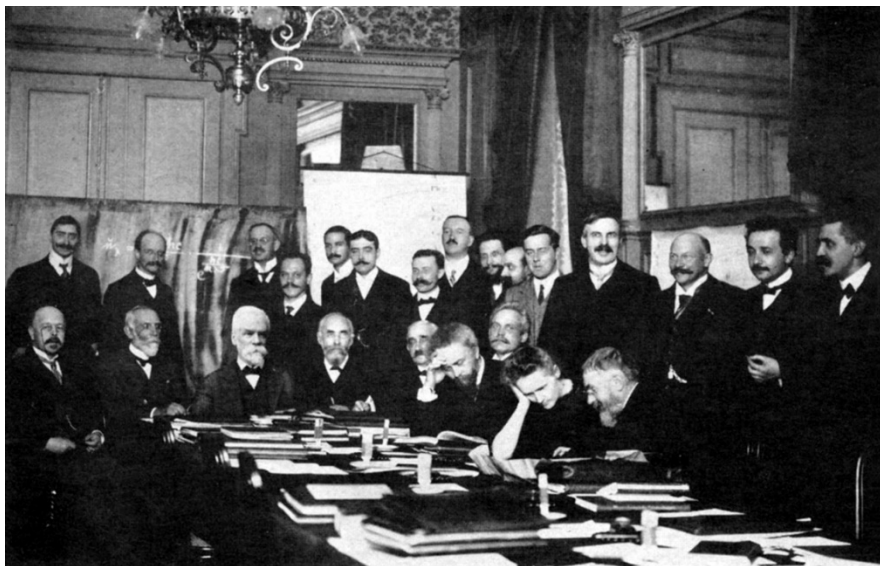
Zo moet het eraan toe zijn gegaan toen Pierre Curie overleed.



Figuur 44. Marie Curie in 1908, met haar twee dochters Eve (links, 1904-2007) en Irène (1897-1956).

Tot op de dag van vandaag is Marie Curie de enige vrouw die twee Nobelprijzen op haar naam heeft staan en de enige persoon die twee Nobelprijzen in twee verschillende wetenschapsgebieden heeft gekregen.

Linus Pauling behaalde weliswaar ook twee Nobelprijzen in verschillende categorieën, maar kreeg naast de wetenschappelijke Nobelprijs voor Chemie (in 1954) die voor de Vrede (in 1962).



Figuur 45. Solvayconferentie te Brussel in 1911.

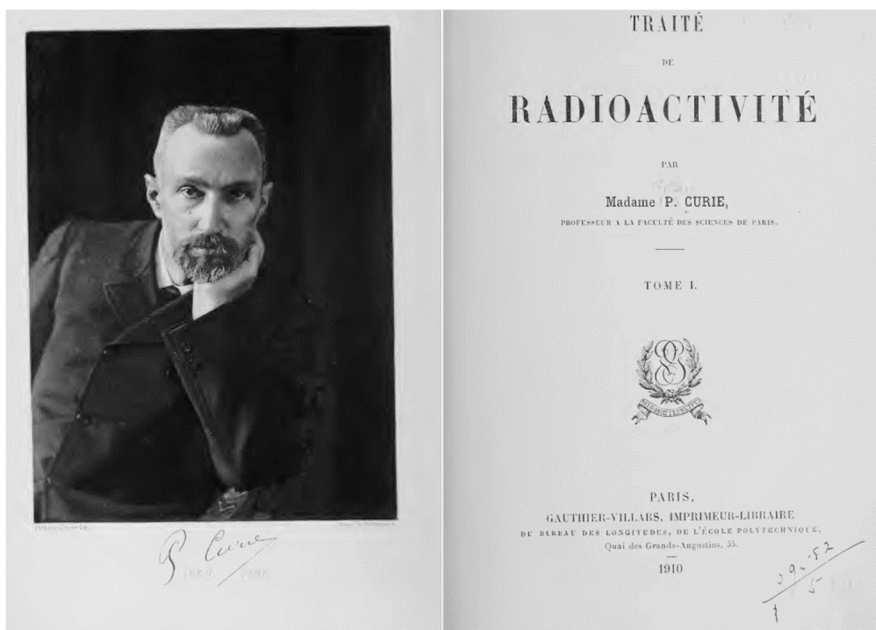
Marie Curie was de enige vrouw die deelnam aan de eerste Solvay-conferentie, in 1911 in Brussel. Dit congres (het eerste van vele) was georganiseerd door de Belg Ernest Solvay en bracht de top van de toenmalige fysica bij mekaar. Ook op latere congressen was Marie Curie meestal de enige vrouw, op bv. de Oostenrijkse Lise Meitner na, dan.

Zittend, van links naar rechts: Walther Nernst, Marcel Brillouin, Ernest Solvay, Hendrik Lorentz, Emil Warburg, Jean Baptiste Perrin, Wilhelm Wien, Marie Curie en Henri Poincaré.

Rechtstaande, van links naar rechts: Robert Goldschmidt, Max Planck, Heinrich Rubens, Arnold Sommerfeld, Frederick Lindemann, Maurice de Broglie, Martin Knudsen, Friedrich Hasenöhl, Georges Hostelet, Edouard Herzen, James Hopwood Jeans, Ernest Rutherford, Heike Kamerlingh Onnes, Albert Einstein en Paul Langevin.



*Figuur 46. Marie Curie op weg
met een van haar mobiele X-straalapparaten.*



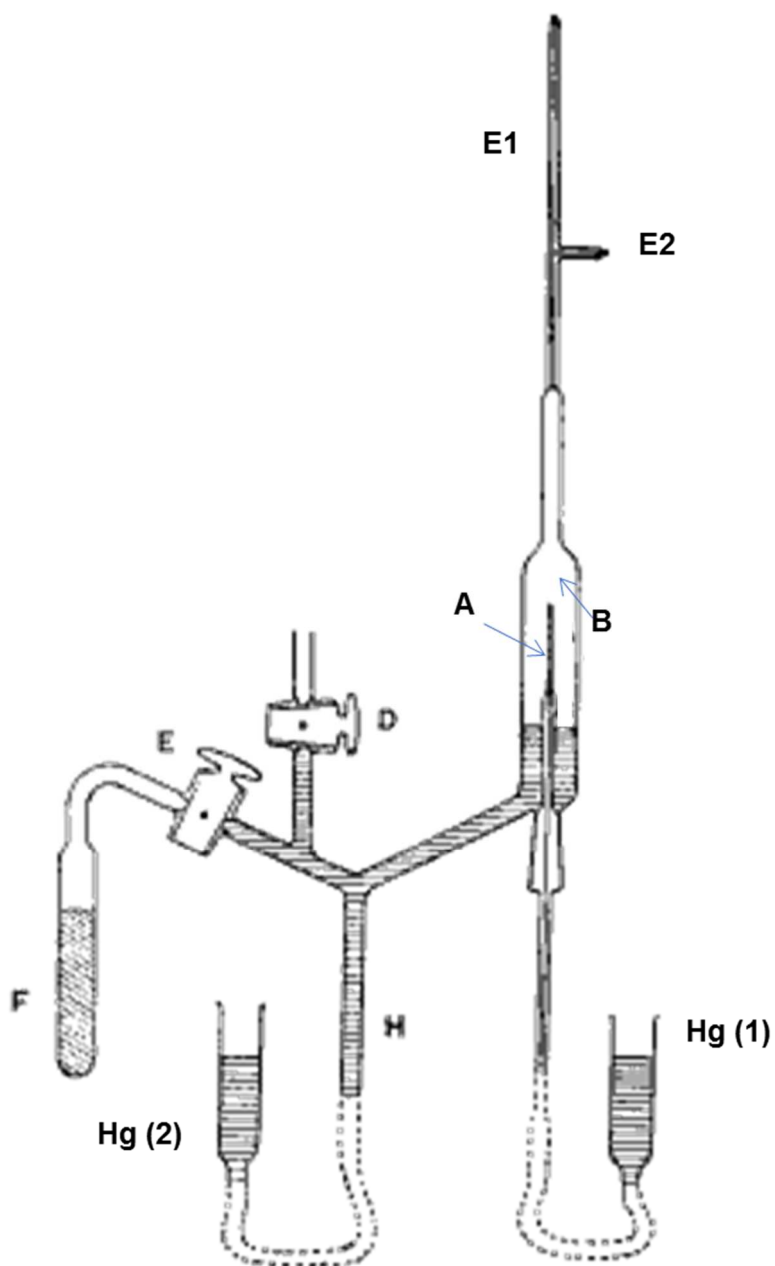
Figuur 47. Titelpagina van het handboek dat Marie Curie schreef rond radioactiviteit.

Het is opgedragen aan haar toen reeds overleden echtgenoot.

(Figuur volgende pagina) Apparaat waarmee Rutherford de aard van de alfadeeltjes aantoonde. In een glazen buisje met een zeer dunne wand (A op de figuur) bracht hij wat hij "emanatie van radium" noemde. Dit is het gas dat ontstaat bij het verval van radium en dat we nu kennen als het edelgas radon. Buisje A wordt met kwik (uit vat Hg(1), gearceerde delen op de figuur) op een bepaalde druk gehouden. Het buisje zit in het midden van een vacuüm getrokken glazen buis B, op zich ook weer afgesloten met een hoeveelheid kwik (uit vat Hg(2)). Deze buis is bovenaan voorzien van elektroden (één in het verticale deel, aangeduid met E1, en één in de horizontale zijarm, aangeduid met E2).

De wand van buisje A is zo dun, dat de alfadeeltjes door de wand kunnen passeren. Gedurende enkele dagen worden de alfadeeltjes uit A opgevangen in buis B. Door het kwikniveau te laten stijgen (uit het reservoir Hg(2)) worden de deeltjes geconcentreerd in het deel met de elektroden. Wanneer een hoge spanning wordt aangelegd tussen die elektroden, sturen de deeltjes een spectrum uit, dat gelijk is aan dat van helium. Hoe langer het experiment duurt, hoe sterker het heliumspectrum.

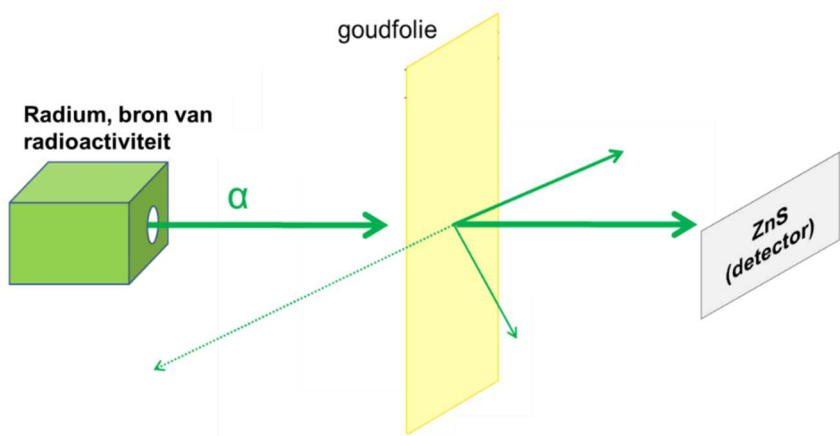
Rutherford deed twee (belangrijke) controle-experimenten. Om te beginnen testte hij of er niet gewoon lucht in het toestel doordrong. Echter, dan had hij niet enkel een heliumspectrum gezien, maar ook een van neon. Daarnaast vulde hij buisje A ook met zuiver helium, maar dan kon hij geen spectrum meer waarnemen (het gas zelf geraakt immers niet door de dunne glaswand).



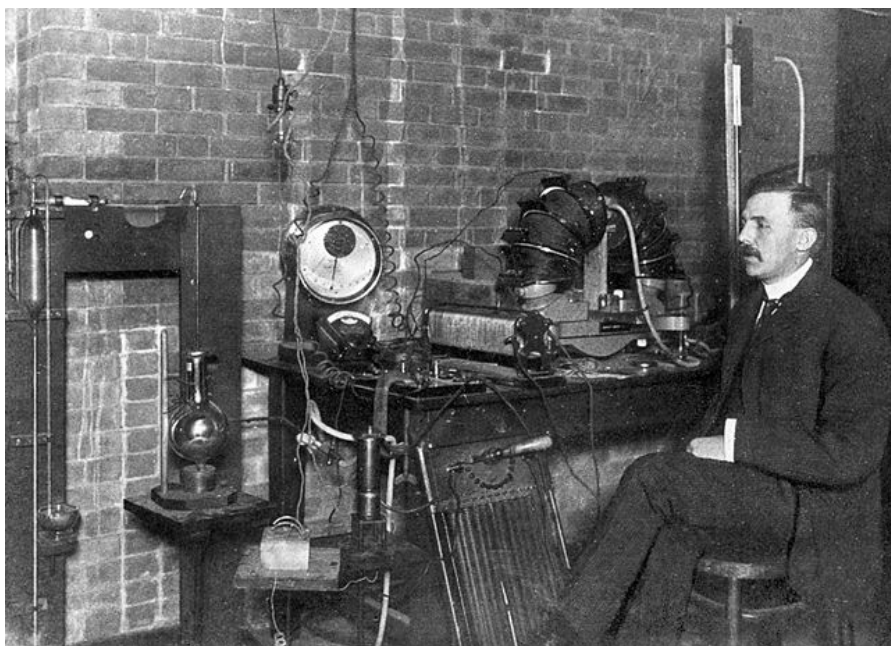
Figuur 48. Opstelling van Rutherford voor het onderzoek naar alfadeeltjes



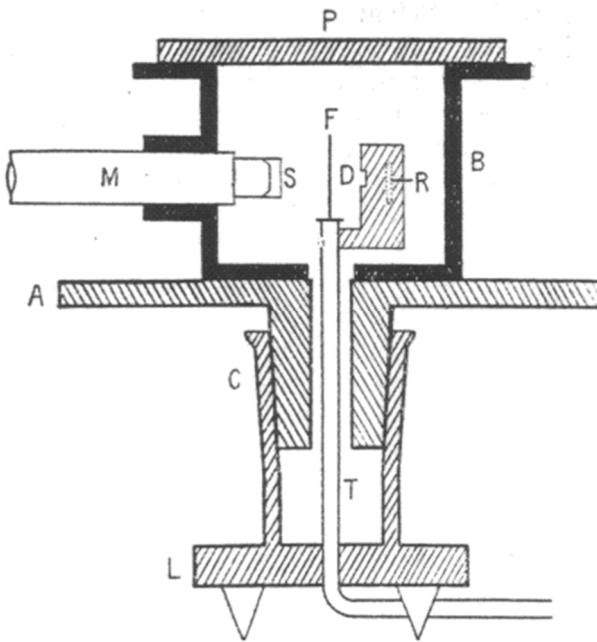
Figuur 49. Heliumspectrum



Figuur 50. Schematische weergave van het experiment van Geiger en Marsden.

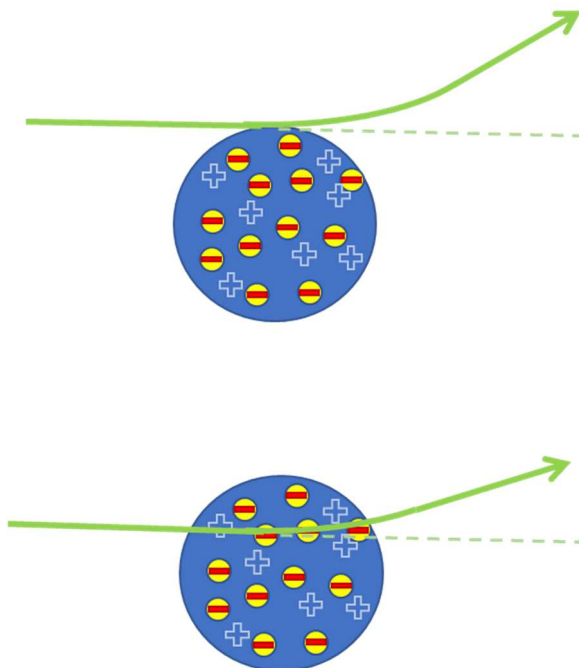


Figuur 51. Ernest Rutherford aan het werk.

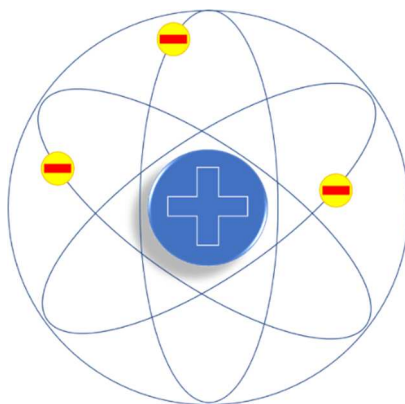


Figuur 52. Schema van het toestel dat Geiger en Marsden gebruikten in hun beroemde experiment.

- (C) luchtdicht koppelstuk – (D) diafragma (om een zeer nauwe bundel van deeltjes aan te maken) – (F) metalen folie –
 (M) microscoop – (P) glazen plaat – (R) radium- of uraniumbron – (S) plaatje uit zinksulfide – (T) buis om lucht in en uit te pompen.



Figuur 53. Scattering volgens de hypothese van Rutherford



Figuur 54. Het Rutherfordatoommodel, schematisch voorgesteld.



Figuur 55. Rutherford (links), Geiger (midden) en Marsden (rechts).

Links: Ernest Rutherford (Spring Grove, Nieuw-Zeeland, 30 augustus 1871 – Cambridge, Groot-Brittannië, 19 oktober 1937). Winnaar van de Nobelprijs voor Chemie in 1908 voor zijn werk in de kernfysica en zijn atoommodel. Rutherford voltooide zijn basisopleiding in Christchurch in Nieuw-Zeeland. Via een beurs kon hij in 1895 terecht in het Cavendish Laboratory aan de Universiteit van Cambridge, waar op dat moment J.J. Thomson de leiding had. Hij werkt er twee jaar aan een doctoraatsonderzoek rond het meten van elektromagnetische golven. Nadien werkt hij enkele jaren als professor in Montreal. In 1907 keert hij terug naar Groot-Brittannië als professor in Manchester. Nog iets later neemt hij het Cavendishlaboratorium over (1919).

Midden: Hans Wilhelm Geiger (30 September 1882, Neustadt an der Haardt, Rhineland, German Empire - 24 September 1945, Potsdam, Germany). Hij is wellicht het best bekend voor de ontwikkeling van de Geigerteller, een toestel om radioactieve straling te meten. In 1912 werd hij leider van de Fysisch-Technische Reichsanstalt in Berlijn, in 1925 professor in Kiel, in 1929 in Tübingen en vanaf 1936 werkte hij in Berlijn. Hij sprak zich nooit in het openbaar uit over de nazi-politiek, maar werkte wel mee aan de ontwikkeling van een atoombom voor het Derde Rijk.

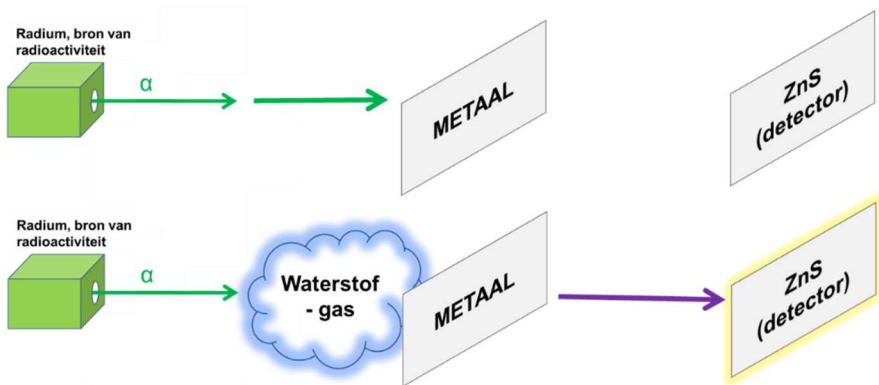
Rechts: Ernest Marsden (19 February 1889, Manchester, England - 15 December 1970 Wellington, New Zealand). In 1915, na de ophefmakende experimenten rond de ontdekking van de atoomkern neemt hij een positie op in Nieuw-Zeeland (op voorspraak van Rutherford). Vanaf 1922 werkt hij in zijn nieuwe thuisland rond wetenschapsbeleid, en werd in 1926 zelfs hoofd van het nieuw opgerichte Ministerie van Wetenschappelijk en Industrieel Onderzoek. Hij promootte tijdens zijn carrière het gebruik van kernenergie, startte een eigen kernwapenprogramma en sprak zich op latere leeftijd dan weer uit tegen het gebruik van dergelijke wapens.



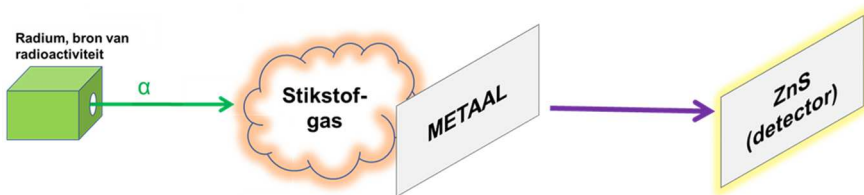
Figuur 56. Antonius van den Broek (links) en Henry Moseley (rechts)

Links: de Nederlandse fysicus Antonius van den Broek (4 mei 1870, Zoetermeer, Nederland – 25 oktober 1926, Bilthoven, Nederland). Foto genomen rond 1903 en gepubliceerd in Yu. I. Lisnevskiy's boek "Antonius van den Broek" (Moskou, 1981, in het Russisch).

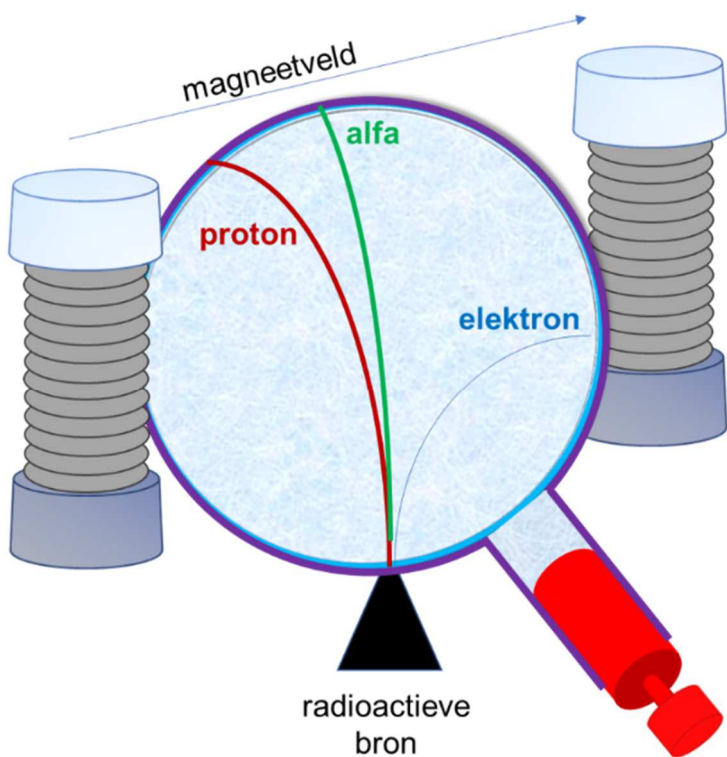
Rechts: Henry Moseley (23 November 1887, Weymouth, Dorset, England - 10 August 1915, Gallipoli, Turkey) in de Balliol-Trinity College Laboratories. Moseley nam tijdens de Eerste Wereldoorlog dienst als technisch communicatie-officier. Hij nam deel aan de Slag om Gallipoli in Turkije en sneuvelde daar op 10 augustus 1915, op zevenentwintigjarige leeftijd. Hij werd in het hoofd geschoten door een Turkse sluipschutter, terwijl hij een bevel aan het doorseinen was. Scheikundige (en science fictionschrijver) Isaac Asimov vatte als volgt samen wat toen ter tijd velen van zijn collega's moeten gedacht hebben: "In view of what he [Moseley] might still have accomplished ... his death might well have been the most costly single death of the War to mankind generally". Asimov vermoedde dat Moseley wellicht in 1916 de Nobelprijs voor Natuurkunde had kunnen winnen – een prijs die nu niet is toegekend. Niels Bohr zei in 1962 dat Rutherfords werk in eerste instantie "niet helemaal serieus werd genomen" en dat "...de grote verandering kwam van Moseley." Wie weet hoe de geschiedenis van de wetenschappen was gelopen als deze man de oorlog had overleefd.



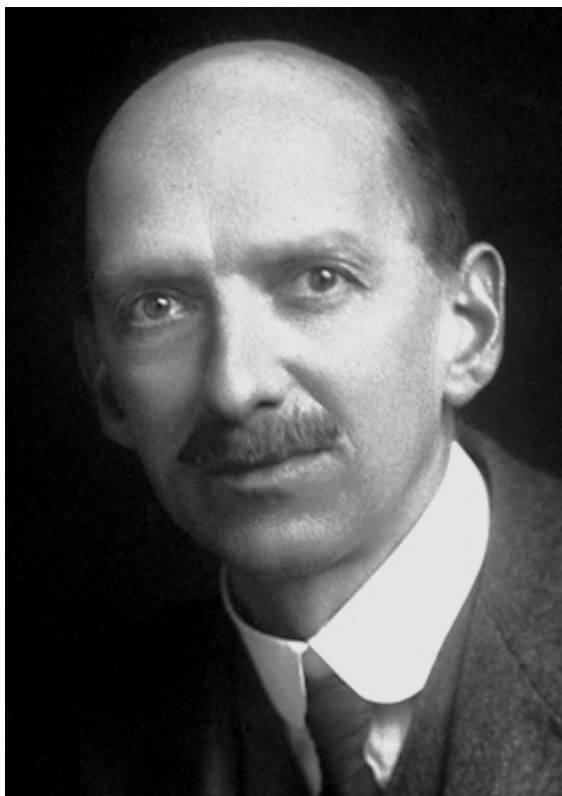
Figuur 57. Experimenten van Rutherford rond het proton (1).



Figuur 58. Experimenten van Rutherford rond het proton (2).

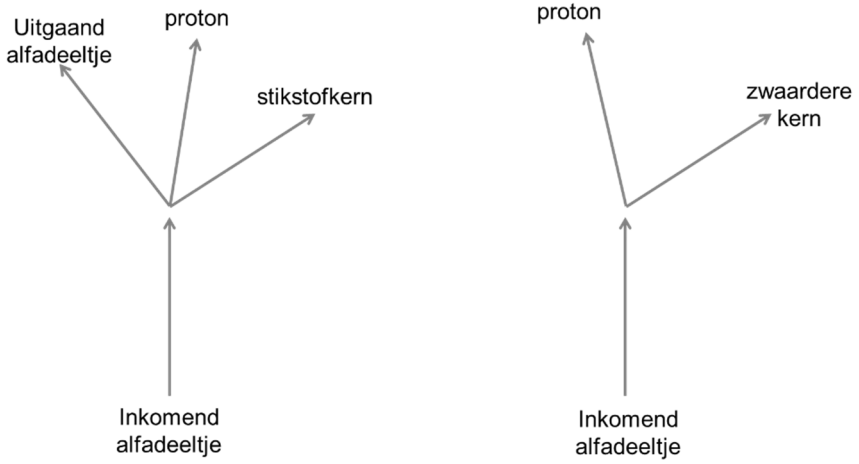


Figuur 59. Schema van de nevelkamer van Wilson.

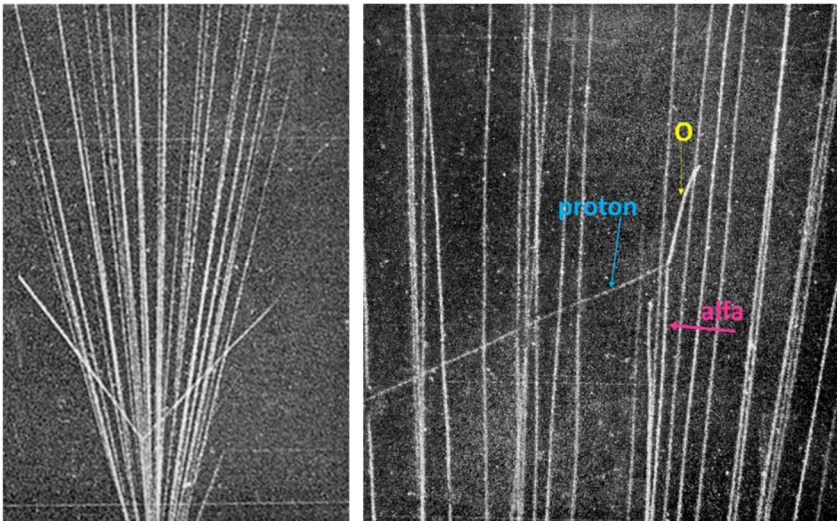


Figuur 60. Charles Wilson.

Charles Thomas Rees Wilson (14 februari 1868 – 15 november 1959) werd geboren op een boerderij in de Pentlandheuvelds in de buurt van Edinburgh. Wilson is beroemd geworden door de ontwikkeling van zijn nevelkamer, een toestel dat Rutherford “the most wonderful experiment in the world” noemde. Een mooi compliment van een wetenschapper die er zelf steeds naar streefde om met een zo eenvoudig mogelijk toestel toch goede, gerichte experimenten uit te voeren. Foto uit 1927.



Figuur 61. Mogelijke verklaringen van de waarnemingen van Rutherford en Blackett.



Figuur 62. Het resultaat van enkele nevelkamerexperimenten.

Links: Botsing tussen twee alfadeeltjes. Ze schieten na de botsing uiteen in twee richtingen die loodrecht op elkaar staat.

Rechts: Het resultaat van de botsing tussen een alfadeeltje en een stikstofatoom levert een proton.



Letters to the Editor

[The Editor does not hold himself responsible for opinions expressed by his correspondents. Neither can he undertake to return, nor to correspond with the writers of, rejected manuscripts intended for this or any other part of NATURE. No notice is taken of anonymous communications.]

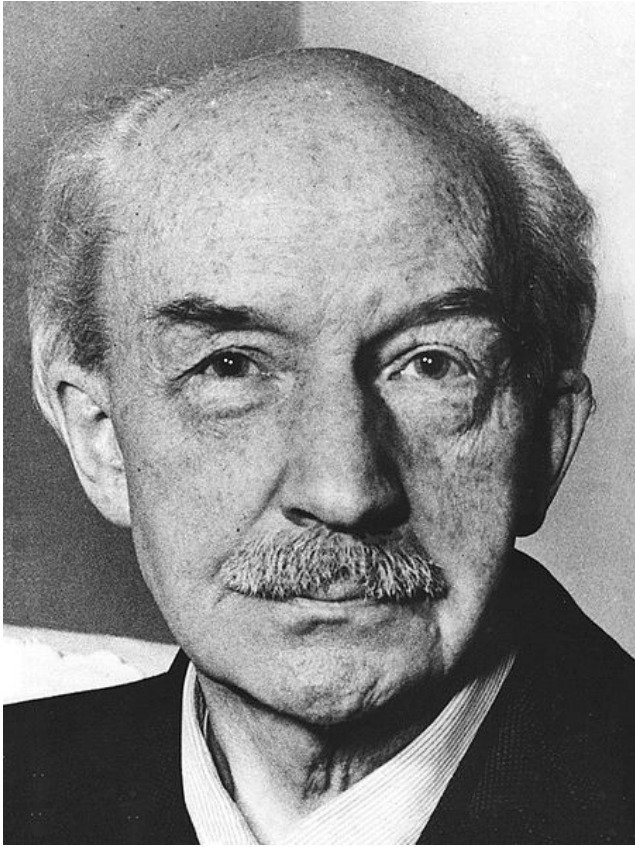
Possible Existence of a Neutron

It has been shown by Bothe and others that beryllium when bombarded by α -particles of polonium emits a radiation of great penetrating power, which has an absorption coefficient in lead of about 0.3 (cm.)^{-1} . Recently Mme. Curie-Joliot and M. Joliot found, when measuring the ionisation produced by this beryllium radiation in a vessel with a thin window, that the ionisation increased when matter containing hydrogen was placed in front of the window. The effect appeared to be due to the ejection of protons with velocities up to a maximum of nearly $3 \times 10^8 \text{ cm. per sec.}$ They suggested that the transference of energy to the proton was by a process similar to the Compton effect, and estimated that the beryllium radiation had a quantum energy of $50 \times 10^6 \text{ electron volts.}$

Figuur 63. James Chadwick

Chadwick (20 oktober 1891, Bollington, Engeland – 24 juli 1974, Cambridge, Engeland) behaalde zijn bachelor- en masterdiploma's in 1911, resp. 1913 in Manchester, waar hij onder andere van Rutherford les kreeg. Hij werd daarna de assistent van Hans Geiger (de oud-medewerker van Rutherford) in Berlijn. Bij het uitbreken van de Eerste Wereldoorlog werd hij als Brit in Duitsland geïnterneerd als krijgsgevangene, maar kon zijn tijd besteden aan chemisch onderzoek. Na de oorlog vervoege hij Rutherford in 1919 in het Cavendishlab in Cambridge. Daar toonde hij in 1932 het bestaan van het neutron aan.

Links: James Chadwick; Rechts de voorpagina van zijn Letter to Nature waarin hij zijn werk ontvouwt.



Figuur 64. Walther Bothe

Walther Bothe (8 januari 1891, Oranienburg, Duitse Keizerrijk - 8 februari 1957, Heidelberg, West-Duitsland) vatte zijn studies in de fysica aan in 1908 aan de Friedrich-Wilhelms-Universität (vandaag de dag de Humboldt-Universität zu Berlin), onder andere onder Professor Max Planck. Vlak voor de Eerste Wereldoorlog behaalde hij daar zijn doctoraat. Tijdens de oorlog diende hij bij de cavalerie. Hij viel echter als krijgsgevangene in handen van de Sovjets en zo verbleef hij vijf jaar in Siberië. Hij leert er Russisch en houdt zich vooral bezig met wiskundig werk. Ook ontmoet hij er zijn latere echtgenote, Barbara Below.

Na zijn terugkeer bleef hij werkzaam aan de Physikalisch-Technische Reichsanstalt in de Duitse hoofdstad, waar hij samen met Hans Geiger onderzoek verrichtte naar de scattering van lichtdeeltjes bij botsing met elektronen (ook wel het Comptoneffect genoemd). Vanaf 1930 bekleedde hij verschillende posities: eerst aan de Justus Liebig-Universiteit van Giessen, daarna aan die van Heidelberg, tot hij in het vizier kwam van de Deutsche Physik-beweging (zie later) die hem in 1934 van die plaats af wou. Om te vermijden dat hij zou emigreren, boden Ludolf von Krehl, Directeur van het Kaiser-Wilhelm Institut für medizinische Forschung, en Max Planck, President of the Kaiser-Wilhelm Gesellschaft hem in 1934 de job aan van directeur van het Institut für Physik (nu het Max Planckinstituut) in die stad. Hij bleef dit tot na de Tweede Wereldoorlog. Hij was er onder andere verantwoordelijk voor de aanschaf van een cyclotron waar hij tijdens de oorlog nuttig wetenschappelijk werk rond het gedrag van neutronen mee kon verrichten. In 1954 kreeg hij de Nobelprijs voor Natuurkunde samen met Max Born, voor hun werk in nucleaire spectroscopie.

Walther Bothe had niet enkel een passie voor wetenschappen, maar ook voor kunst en klassieke muziek. Hij was een begaafd pianist en hield vooral van Bach en Beethoven.



Figuur 65. Frédéric Joliot en Irène Joliot-Curie.

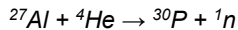
Foto uit de jaren 1940.

Irène Curie (12 september 1897, Parijs, Frankrijk – 17 maart 1956, Parijs, Frankrijk), dochter van Marie en Pierre Curie-Sklodowska, was van jongs af betrokken bij het werk van haar ouders. Ze studeerde aan de Sorbonne tussen 1912 en 1914 (nota bene vanaf een leeftijd van vijftien jaar), maar moest bij de start van de Eerste Wereldoorlog vluchten naar het platteland. Ze werd daar een jaar later verenigd met haar moeder, met wie ze zij aan zij werkte in veldhospitelen voor de behandeling van oorlogsslachtoffers.

De Curies hadden gezorgd voor primitieve X-straalapparatuur, wat het werk van de artsen in die veldhospitelen een pak effectiever maakte om de wonden van de getroffen militairen goed te behandelen, maar wellicht hebben beide vrouwen tijdens die jaren reeds veel te veel straling van de slecht beschermde toestellen moeten doorstaan. Beiden zijn overigens te vroeg gestorven, wellicht door overmatige blootstelling aan radioactieve en andere straling tijdens hun professionele bezigheden.

Na de oorlog werkte Irène Curie aan haar doctoraatsproefschrift rond het verval van polonium. Daar leerde ze Frédéric Joliot (19 maart 1900, Parijs, Frankrijk – 14 augustus 1958, Parijs, Frankrijk) kennen, die in hetzelfde instituut werkte als assistent van haar moeder. Curie promoveerde in 1925 tot Doctor in de

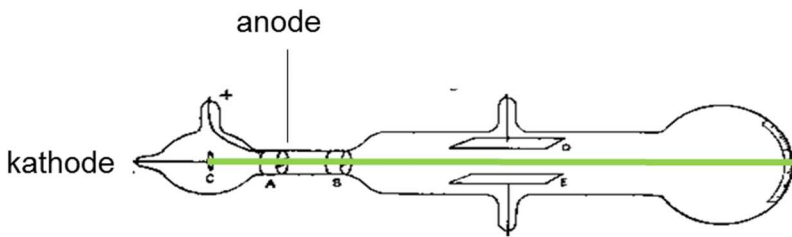
Wetenschappen; het paar trouwde in 1926. Nadien werkten ze samen verder rond kunstmatige radioactieve reacties, waarbij kortlevende radioactieve isotopen werden gecreëerd. Ze maakten radioactief stikstof uit boor, fosfor uit aluminium en silicium uit magnesium, bv.



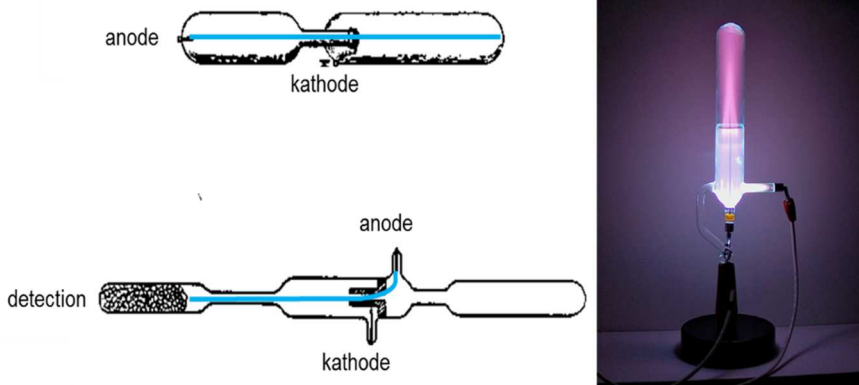
Het leverde hen de Nobelprijs op in 1935. Hun werk stimuleerde een groep Duitse fysici, aangevoerd door Otto Hahn, Lise Meitner en Fritz Strassman, om verder onderzoek te doen naar de splijting van atoomkernen.

Tijdens de Tweede Wereldoorlog waren beide wetenschappers actief in het verzet tegen de Duitse invallers, wat hen beide later het Légion d'Honneur opleverde. Zowel voor als na de oorlog bekleedden beide wetenschappers hoge posities in de Franse administratie. Nog in 1936 werd Irène Joliot-Curie Sous-secrétaire d'État voor wetenschappelijk onderzoek. Frédéric Joliot-Curie werd in 1945 voorzitter van het Commissariat à l'Énergie Atomique; Irène werd er commissaris. Tegelijk had ze de functie van directeur van het Institut du Radium, opgericht door haar moeder. In 1950 werden ze tezamen aan de deur gezet in het Commissariat, omwille van hun politieke banden met de communistische partij in Frankrijk.

Ondertussen was er leukemie vastgesteld bij Irène Joliot-Curie. Ze stierf aan de ziekte in 1956. Frédéric Joliot-Curie nam haar positie als hoofd van de afdeling Kernfysica aan de Sorbonne over, maar overleed zelf niet lang nadien, in 1958. Hun kinderen, Hélène Langevin-Joliot en Pierre Joliot, zetten ondertussen de familiale traditie voort, zij als professor in kernfysica aan de Universiteit van Parijs, en hij als biochemicus aan het Centre National de la Recherche Scientifique.



Figuur 66. De kathodestraalbuis van Thomson

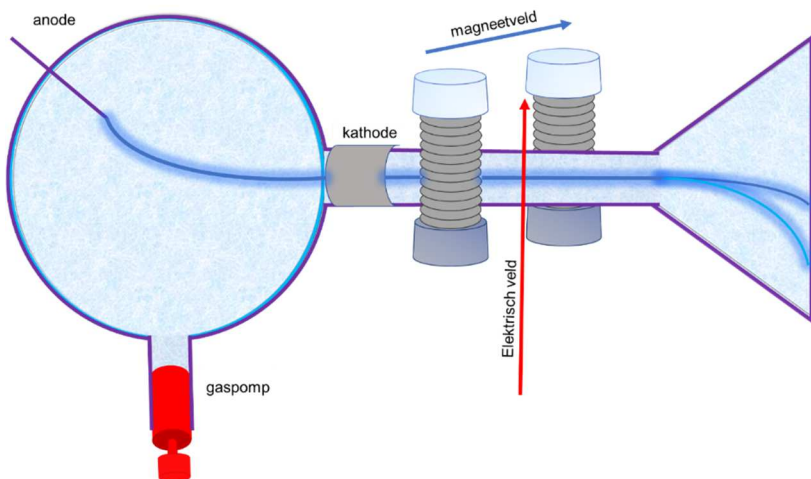


Figuur 67. Anodestraalbuizen

*Links: Schematische weergave van de werking van een anodestraalbuis.
 Bovenaan staat het toestel van Goldstein uit 1886, onderaan een verbeterde
 versie, gebouwd in het Cavendish lab van Thomson. Beide tekeningen zijn een
 bewerking van een originele schets van Thomson.
 Rechts: Anodestraalbuis in werking*

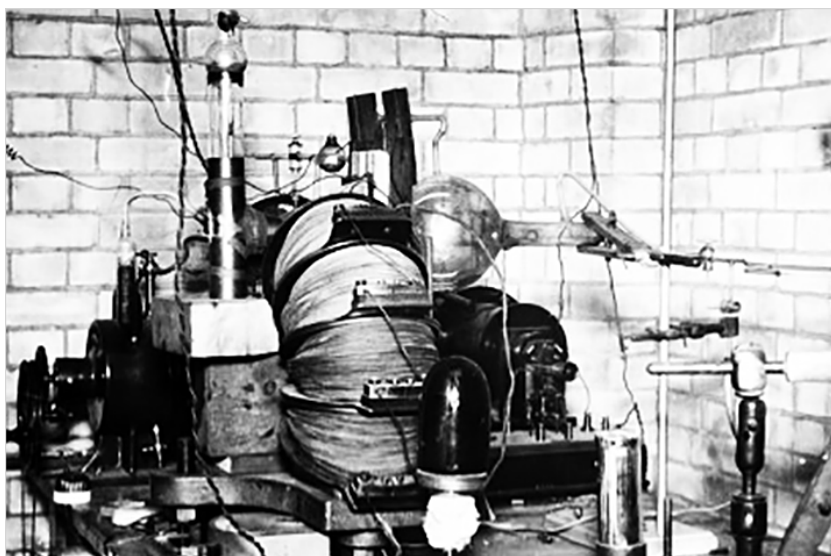
Zie ook <https://www.youtube.com/watch?v=WiNB7E0CtgU>

Ondertussen (in 1898) had de Duitse onderzoeker Wilhelm Wien reeds

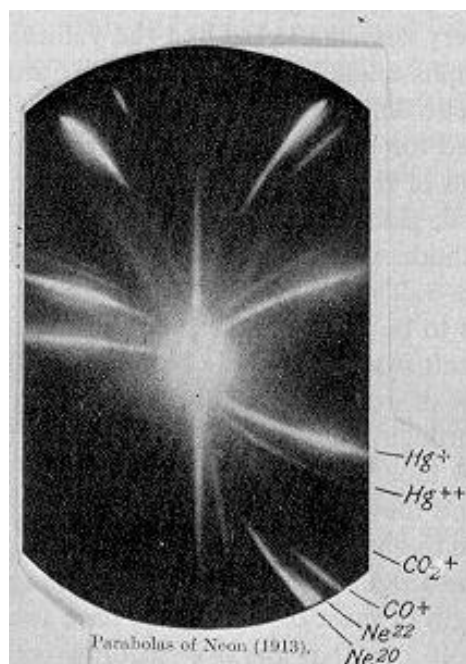


Figuur 68. Schematische weergave van de opstelling van J.J. Thomson voor de studie van anodestralen.

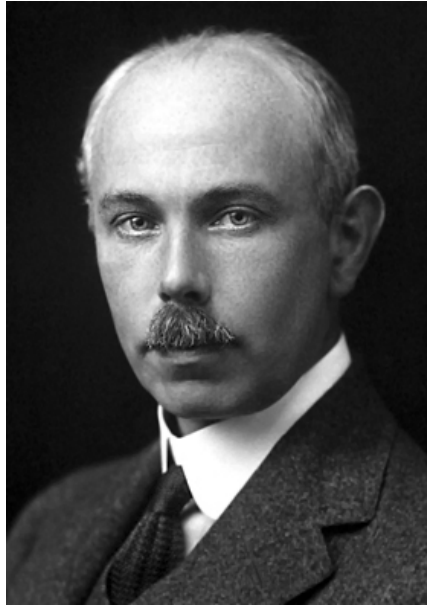
De straal wordt eerst opgewekt in een elektrisch veld, waarin een gas wordt geïoniseerd. Dit gas passeert vervolgens door een magneetveld. De afbuiging wordt gemeten op een fotografische plaat aan de rechterzijde.



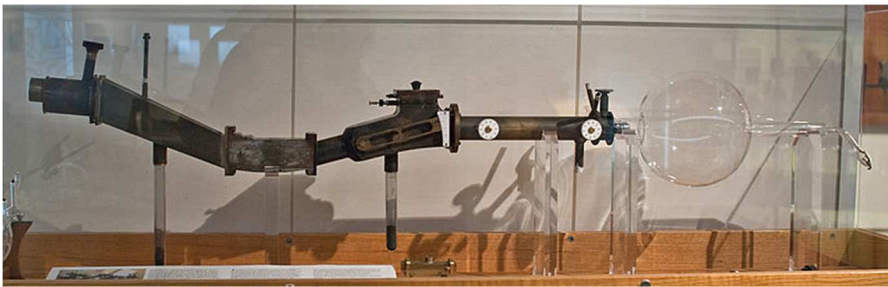
Figuur 69. Laboratoriumopstelling van J.J. Thomson uit 1909 voor onderzoek naar anodestralen.



Figuur 70. Fotografische plaat waar de sporen van de twee isotopen van neon op te zien zijn.



Figuur 71. Francis William Aston.



Figuur 72. Een van de versies van de massaspectrometer, gebouwd door Francis Aston.

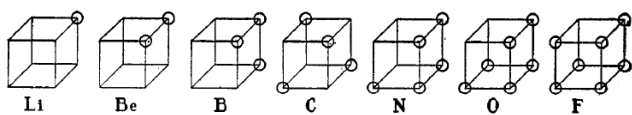


Figuur 73. Kenneth Bainbridge

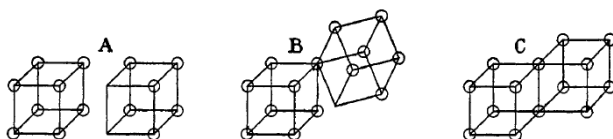
*Hoewel Kenneth Bainbridge (27 juli 1904, Cooperstown, New York - 14 juli 1996, Lexington, Massachusetts) in feite elektrisch ingenieur wilde worden (aan het MIT), bleek de roep van de fysica te groot. In 1926 startte hij met zijn doctoraatsonderzoek, wat zou leiden tot een (met succes verdedigde) thesis in 1929, getiteld *A search for element 87 by analysis of positive rays*.*

In 1933 en 1934 had hij de kans om met een onderzoeksbeurs enige tijd door te brengen in het Cavendishlab van Rutherford in Cambridge. Bij zijn terugkeer in de VS in 1934 kreeg hij een positie aangeboden op Harvard. Deze Amerikaanse onderzoeker was een van de vaders van de nucleaire spectroscopie en bouwde tijdens zijn carrière massaspectrometers en cyclotrons om isotopen en isotopenscheiding te bestuderen.

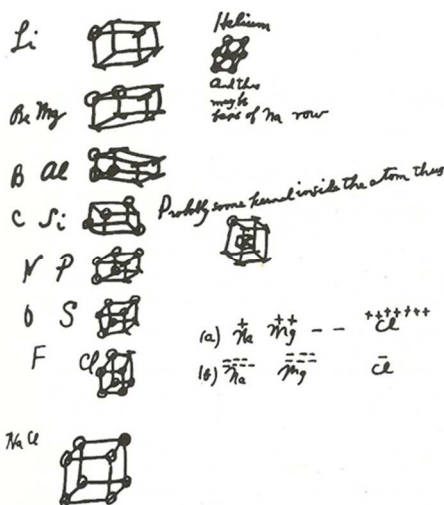
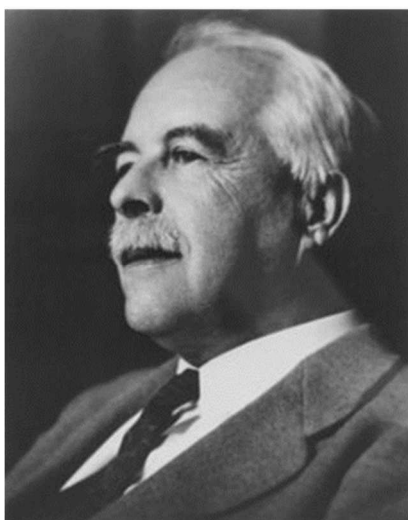
Tijdens de Tweede Wereldoorlog was hij verantwoordelijke voor de Trinity test (de eerste proef met een kernwapen op 16 juli 1945). Zijn eerste opmerking vlak na de test was het legendarische "Now we're all sons of bitches." – een opmerking die Oppenheimer, de leider van het kernwapenonderzoek tijdens de oorlog, later beschreef als een van de beste dingen die op dat moment gezegd zijn. Na de oorlog keerde Bainbridge terug naar Harvard. Hij bleef de rest van zijn leven actief tegenstander van het militair gebruik van kernenergie.



Figuur 74. De elementen van de tweede periode volgens Lewis



Figuur 75. Bindingen tussen twee atomen volgens Lewis.



Figuur 76. Gilbert N. Lewis (links) -Zijn originele nota's uit 1902 (rechts)

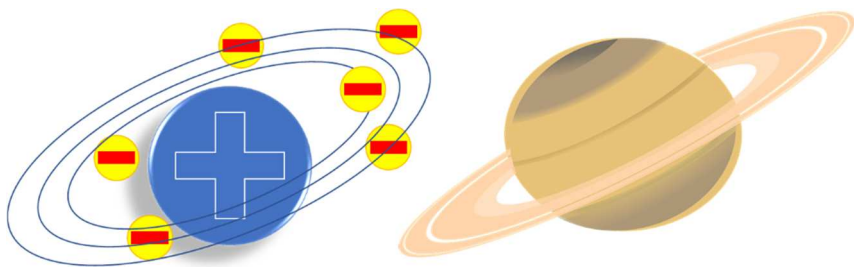
Gilbert N. Lewis (23 oktober 1875 - Weymouth, Massachusetts, USA ; 23 maart 1946 – Berkeley, Californië, USA) werd opgeleid aan de Universiteit van Nebraska en later aan Harvard, waar hij ook enkele jaren praktijkvakken verzorgde. Na een jaar op de Filippijnen verkreeg hij een positie op het MIT. In 1912 vertrok hij daar en werd professor in fysische scheikunde aan de Universiteit van Californië, te Berkeley. Zijn belang voor de scheikunde kan niet worden overschat: hij droeg bij aan de thermodynamica van chemische reacties, ontwikkelde mee de theorie achter de covalente binding (waar Linus Pauling dan op voortborduurde) en stelde een vernieuwde theorie voor de activiteit van zuren en basen voor. Hij was de eerste die zwaar water (met deuterium op de plaats van neutronenloze waterstofatomen) produceerde, en stelde de term foton voor als eenheid van licht.

Ofschoon de man wellicht een van de best bekende chemici is (toch zeker bij een schoolgaand publiek dat Lewisformules moet leren tekenen), heel wat bijgedragen heeft aan de scheikunde en maar liefst 41 maal genomineerd was voor de Nobelprijs, heeft hij de begeerde medaille nooit gekregen. Hij overleed in zijn labo aan een dosis blauwzuur. Of het een ongeval, dan wel zelfmoord was, is nooit echt duidelijk geworden.



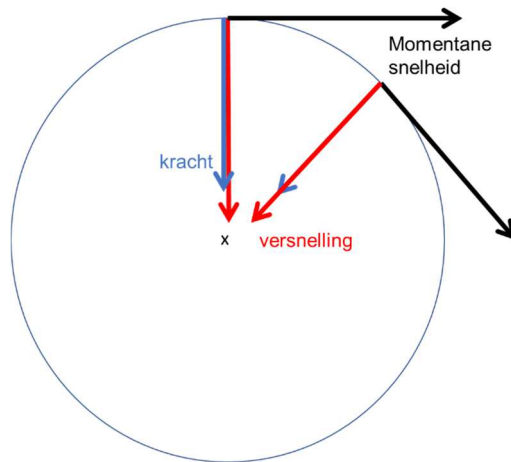
Figuur 77. Irving Langmuir

Langmuir (31 januari 1881, Brooklyn, New York, U.S. – 16 augustus 1957, Woods Hole, Massachusetts, U.S.) bij de toekenning van zijn Nobelprijs in 1932.



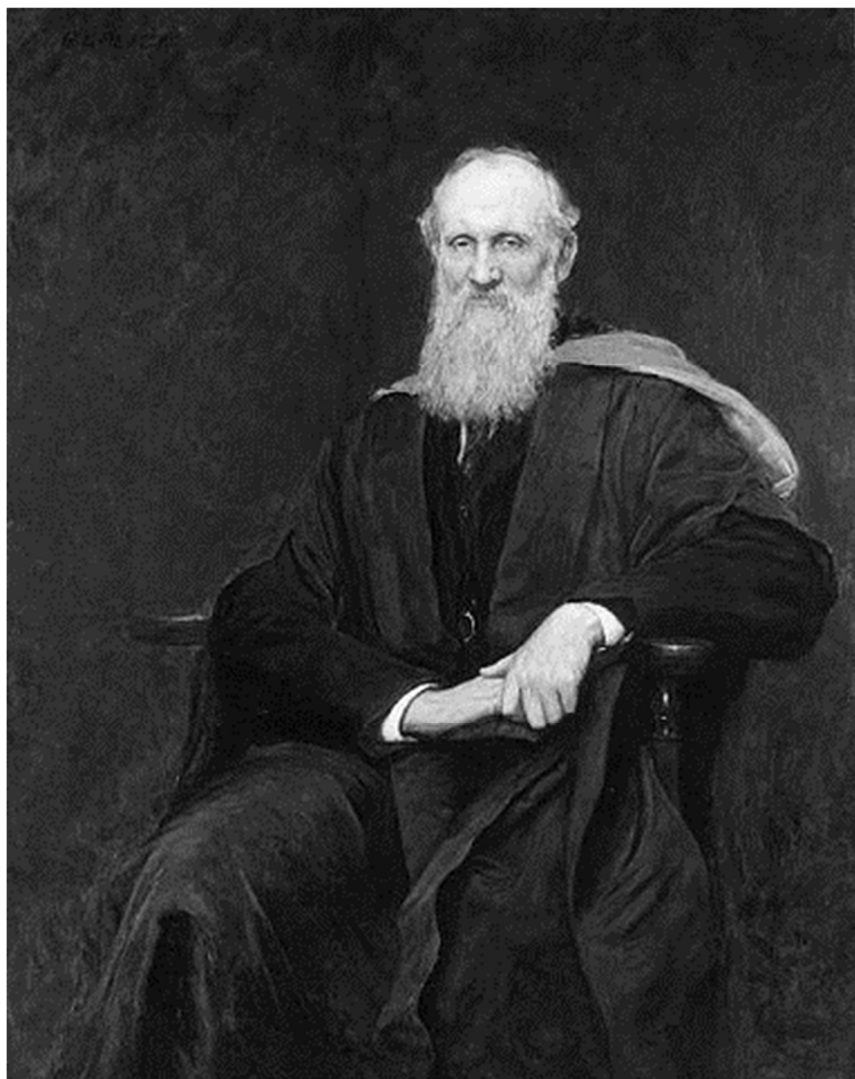
Figuur 78. Het Saturniaanse model van Nagaoka

In



Figuur 79. De eenparig cirkelvormige beweging.

We begrijpen versnelling allemaal intuïtief als een verandering van snelheid. Gaat het over een lineaire beweging (onze wagen op een recht stuk autosnelweg), dan is versnelling inderdaad een verandering van de grootte van de snelheid. Bij een cirkelvormige beweging (zoals op een paardenmolen, of in een bocht) verandert onze snelheid echter ook, maar niet in grootte maar in richting. We blijven in een bocht bewegen omdat we op een of andere manier naar het centrum van de cirkel waarop we draaien, worden aangetrokken. De kracht die deze aantrekking veroorzaakt, is een zogenaamde centripetale of middelpuntszoekende kracht (blauwe pijl).



Figuur 80. Lord Kelvin

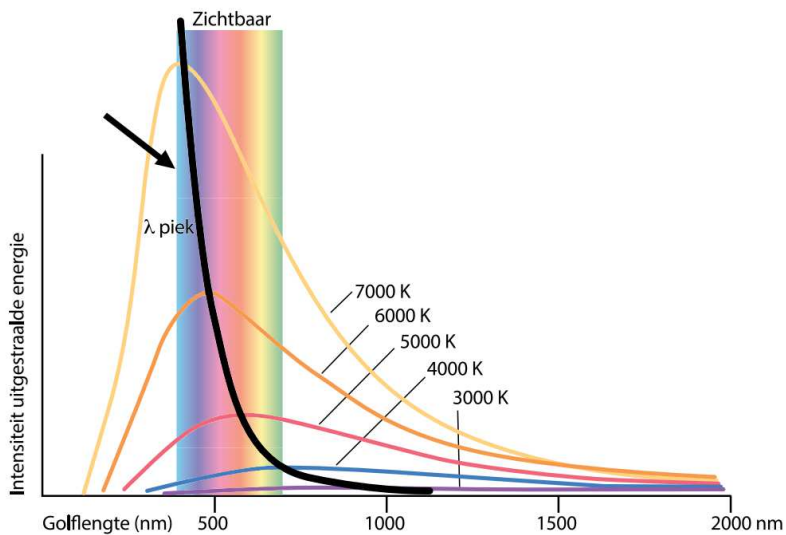
William Thomson, Lord Kelvin (26 juni 1824, Belfast, Noord-Ierland, Groot-Brittannië – 17 december 1907, Ayrshire, Schotland, Groot-Brittannië). Dee veelzijdige wetenschapper droeg bij aan de wiskundige beschrijving van onze toenmalige kennis van elektriciteit, aan de formulering en interpretatie van de eerste en tweede hoofdwet van de thermodynamica. Zo ontwikkelde hij het idee van het absolute temperatuursnulpunt. Ook de term kinetische energie is door Lord Kelvin bedacht. Daarnaast toonde hij zich ook bijzonder capabel om praktische problemen en technische opdrachten aan te pakken. Zo leverde hij een onmisbare bijdrage aan de constructie van de trans-Atlantische telegrafiekabel (waarvoor hij in 1866 geridderd werd), verbeterde hij het zeemanskompas en ontwikkelde hij een telegraaf voor duikboten, in staat om elke 3,5 seconden een teken te versturen.

Omwille van zijn bijdragen tot de thermodynamica (en omdat hij zich als geboren Ier had uitgesproken tegen Home Rule, de politieke beslissing dat de Ieren zelf zouden moeten kunnen beslissen over wat er op het eiland zelf diende te gebeuren, een stap in de richting van Ierse onafhankelijkheid) werd hij vervolgens in 1892 in de adelstand verheven als Baron Kelvin, van Largs, county Ayrshire. Zijn hele leven bleef hij verbonden aan de Universiteit van Glasgow. Hij publiceerde meer dan 650 wetenschappelijke papers en een zeventigtal patenten (waarvan er vele werden toegekend).



Figuur 81. Hete voorwerpen krijgen een kleur.

Denk maar aan gloeiende kolen, of aan het verband tussen de kleur van een ster en haar temperatuur.

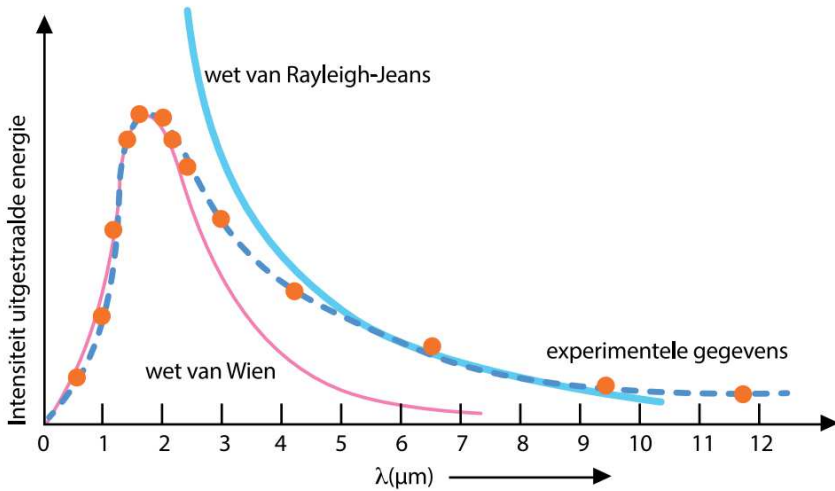


Figuur 82. Naarmate de temperatuur van een voorwerp stijgt, wordt de golflengte van de piek van het uitgestraalde licht korter.



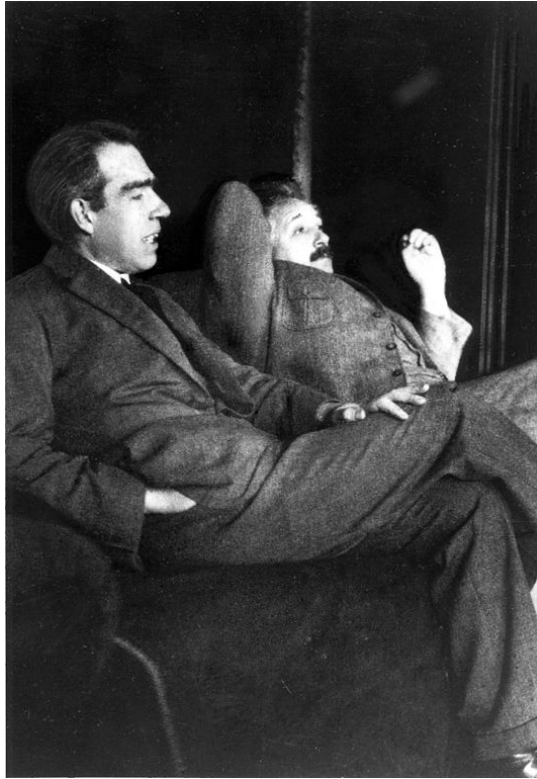
Figuur 83. Max Planck

Max Karl Ernst Ludwig Planck (23 april 1858, Kiel, Hertogdom Holstein (nu Duitsland) - 4 oktober 1947, Göttingen, Nedersaksen, Duitsland)



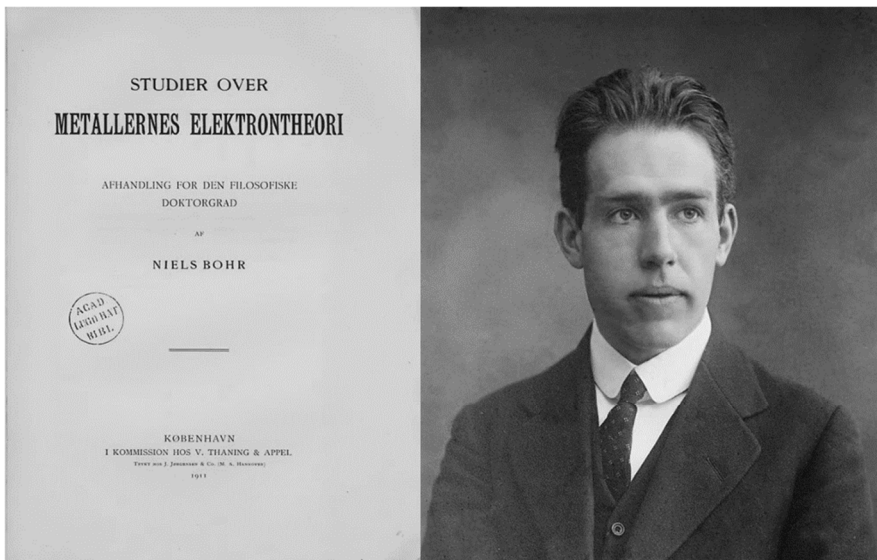
Figuur 84. De vergelijking tussen de wetten van Rayleigh-Jeans, Wien en Planck

Noch de wet van Rayleigh-Jeans, noch die van Wien konden tot ieders tevredenheid de meetresultaten rond de straling van een zwart lichaam verklaren. Pas toen Planck zijn vergelijking voorstelde (stippellijn) klopte het plaatje. Alleen wist niemand waarom.



Figuur 85. Niels Bohr en Albert Einstein

Niels Henrik David Bohr (7 oktober 1885, Kopenhagen, Denemarken – 18 november 1962, Kopenhagen, Denemarken) was de eerste wetenschapper die de nieuwe kwantumtheorieën koppelde aan de structuur van atomen. Het leverde hem in 1922 de Nobelprijs voor Natuurkunde op.



PROBLÈMES DE LA THÉORIE ÉLECTRONIQUE DU MAGNÉTISME

PAR Mlle H.-J. VAN LEEUWEN.

I. — Introduction.

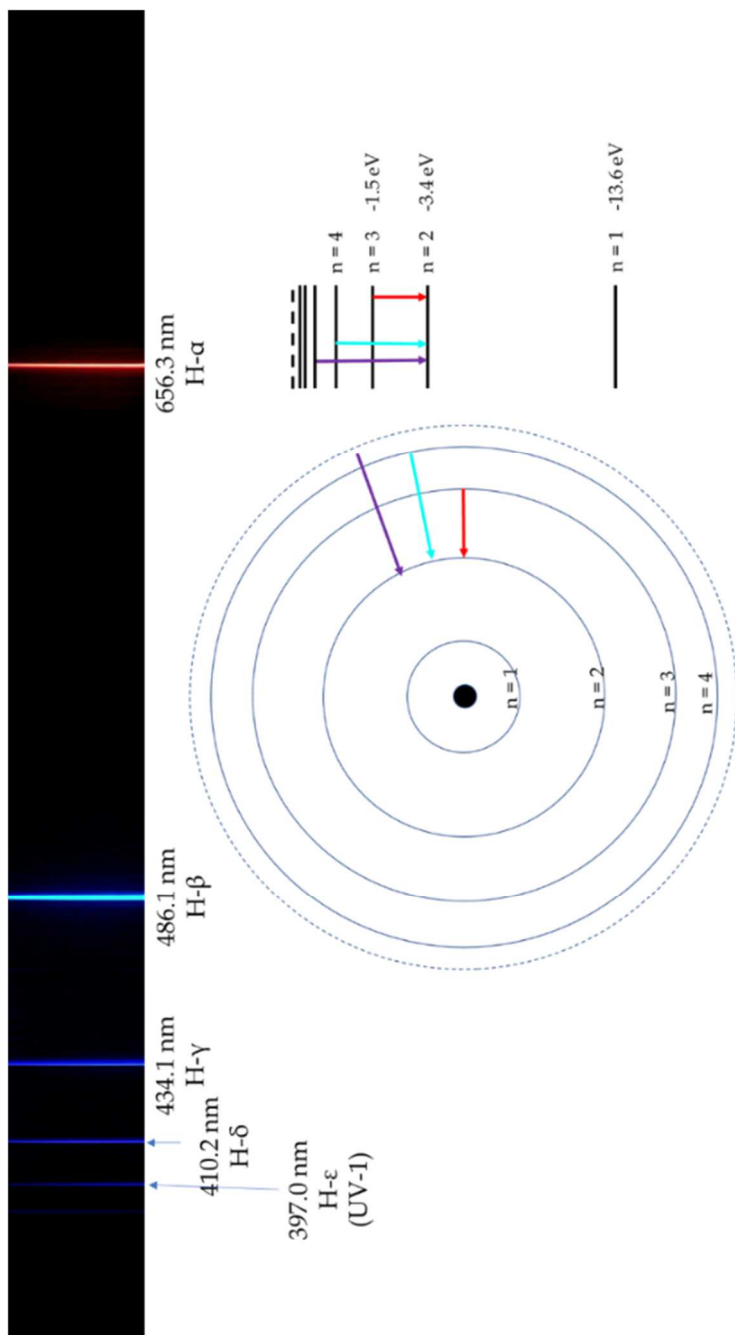
Dans cet article (1) la théorie électronique du magnétisme sera étudiée sur les cas les plus simples. Il y a encore de grandes divergences d'opinion sur les points principaux de cette théorie; il suffit, pour s'en rendre compte, de consulter les résultats de Lenz (2), Zeeman (3) et Van Leeuwen (4).

Figuur 86. De jonge Bohr en zijn eerste wetenschappelijke bijdrage

Linksboven: Schutblad van het doctoraat van Niels Bohr. Hij zei later dat hij uit de vragen van de jury bij zijn verdediging had begrepen, dat zij zijn werk vooral niet hadden begrepen.

Rechtsboven: de jonge Bohr.

Onderaan: Publicatie van Van Leeuwen

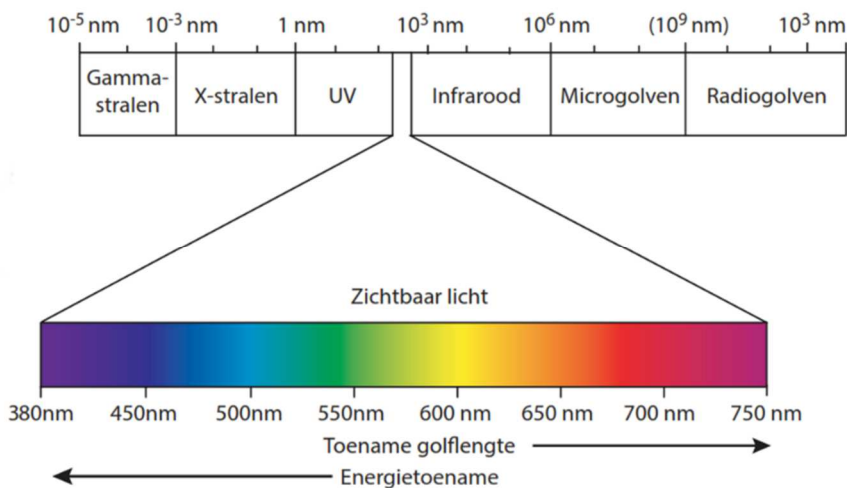


Figuur 87. Het zichtbare deel van het waterstofspectrum.

Het spectrum van waterstofatomen is opgebouwd uit verschillende lijnen. Elk van die lijnen komt overeen met een sprong van een elektron van een hoger naar een lager niveau – een sprong waarbij dat elektron energie verliest en dit als een foton uitzendt. De kleur van elke lijn komt daarbij overeen met de golflengte van het bijbehorende licht. Die is rechtstreeks gekoppeld aan de energie die het elektron verliest en uitzendt door naar een lager niveau te vallen. Als het elektron voldoende energie opdoet, kan het zelfs het atoom verlaten: hiervoor moet het voldoende energie krijgen om voorbij de stippellijn op de figuur (hierboven) te springen. Fysici hebben afgesproken om dat niveau aan te duiden met 0 eV. Lagere schillen hebben dan een negatief energieniveau, maar dat is verder een kwestie van afspraak. In de praktijk betekent het dat een elektron van de laagste schil 13,6 eV aan energie moet opdoen om het atoom uit te springen. Er blijft dan een positief geladen ion achter.

Traditioneel onderscheidt men verschillende groepen van lijnen. De zichtbare lijnen op de figuren hierboven vormen de Balmerreeks, naar hun ontdekker Johann Balmer. Het Bohrmodel verklaart hun bestaan als de reeks fotonen die ontstaan wanneer elektronen van hogere niveaus terugvallen naar het tweede niveau ($n = 2$). De Balmerlijnen worden vaak gebruikt in de astronomie. Waterstof is immers de belangrijkste component van jonge sterren, die dan ook zeer duidelijke Balmerlijnen tonen in het licht dat ze uitzenden.

Overigens is het spectrum van waterstof niet beperkt tot de Balmerreeks alleen. Ook in het niet-zichtbare deel van het spectrum vinden we dergelijke lijnenreeksen. De Lymanreeks (een reeks lijnen in het kortgolvig licht tussen 91,1 en 121,6 nm) ontstaat wanneer elektronen terugvallen op niveau 1. Deze reeks werd overigens pas ontdekt nadat het model van Bohr het bestaan van deze lijnen voorspelde.



Figuur 88. Ter herinnering: het spectrum van de elektromagnetische golven.

Zichtbaar licht: 400 nm tot 700 nm

(van violet naar rood)

Nabije infrarood: 700 nm tot 1300 nm

Midden-infrarood: 1300 nm tot 2500 nm

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = \frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3 \cdot c} \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

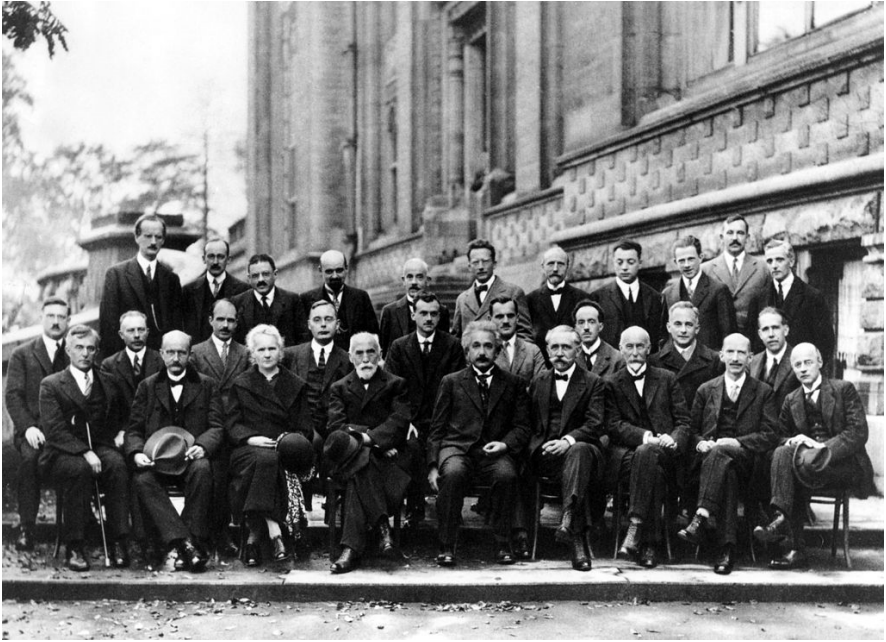
Figuur 89. De berekening van de Rydbergconstante.

Voor de liefhebbers van een mooie formule: hier is ze dan, de theoretische berekening van de Rydbergconstante R . λ is de golflengte van de spectraallijn, n_1 en n_2 de twee energieniveaus waartussen het elektron zich beweegt (waarbij n_1 kleiner is dan n_2), m_e en e de massa en de lading van een elektron, h de constante van Planck, c de snelheid van het licht en ε_0 de diëlektriciteitsconstante in een vacuüm (maar daarvoor moet u maar even een natuurkundeboek openslaan).



Figuur 90. Hafnium

Een van de bijkomende conclusies uit Bohrs atoommodel was dat er nog minstens vier elementen ontbraken op het Periodiek Systeem der Elementen. Een ervan (element 72) was een element dat op zirkonium (Zr) moest gelijken, volgens Bohr. Op basis van die chemische informatie konden Coster en de Hevesy, assistenten van Bohr, het element terugvinden in de collectie mineralen van het Museum voor Mineralogie in Kopenhagen. Het werd, ter ere van de stad Kopenhagen, hafnium (Hf) genoemd – naar de Latijnse benaming van de stad, Hafnia.

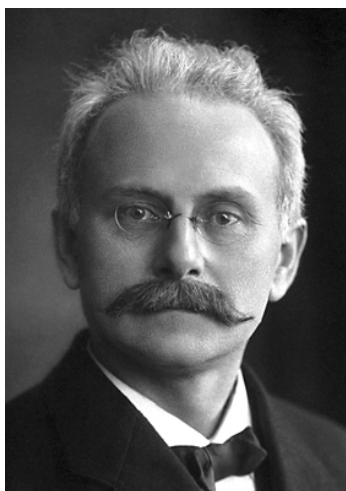


Figuur 91. Groepsfoto op de Solvay Conference on Quantum Mechanics van 1927 (in Brussel).

Achteraan (staand) van links naar rechts : Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin,

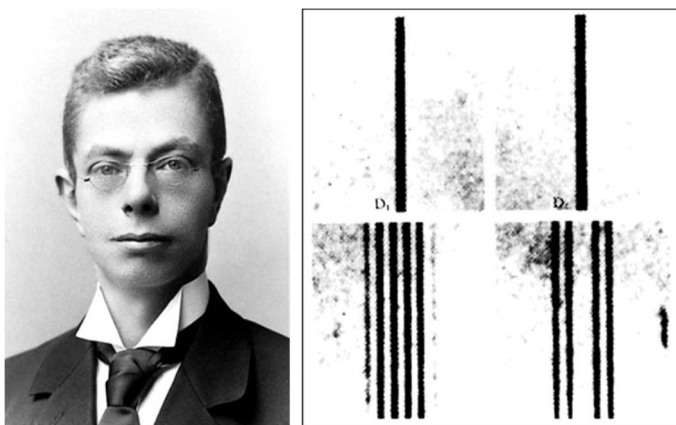
Midden: Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr.

Vooraan: Irving Langmuir, Max Planck, Marie Skłodowska Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willams Richardson.



Figuur 92. Johannes Stark.

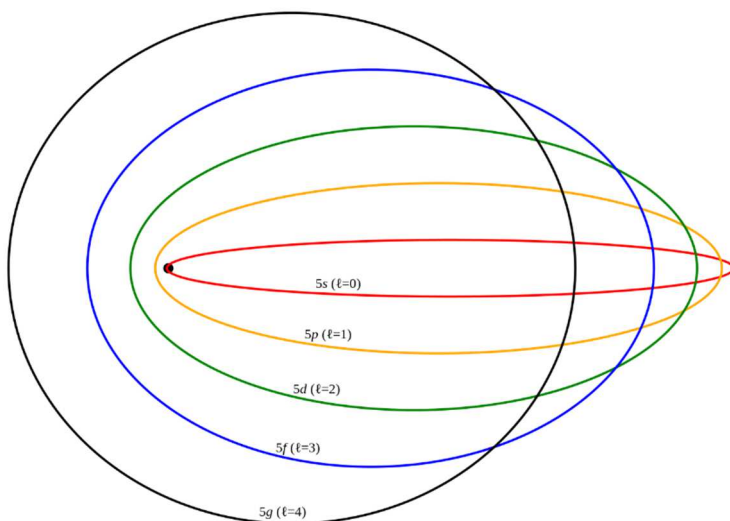
Johannes Stark (Schickenhof, 15 april 1874 – Traunstein, Duitsland, 21 juni 1957) kreeg de Nobelprijs in de natuurkunde voor zijn ontdekking van het dopplereffect in kanaalstralen en van de splitsing van spectraallijnen in elektrische velden.



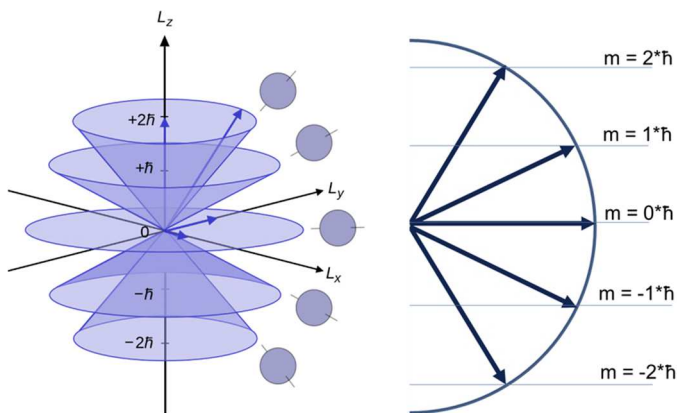
Figuur 93. Pieter Zeeman en het Zeemaneffect.

Links: Pieter Zeeman (25 mei 1865, Zonnemaire, Nederland –9 oktober 1943, Amsterdam, Nederland). Foto uit 1902.

Rechts: Afbeelding van de opsplitsing van spectraallijnen van natrium door een extern magneetveld.

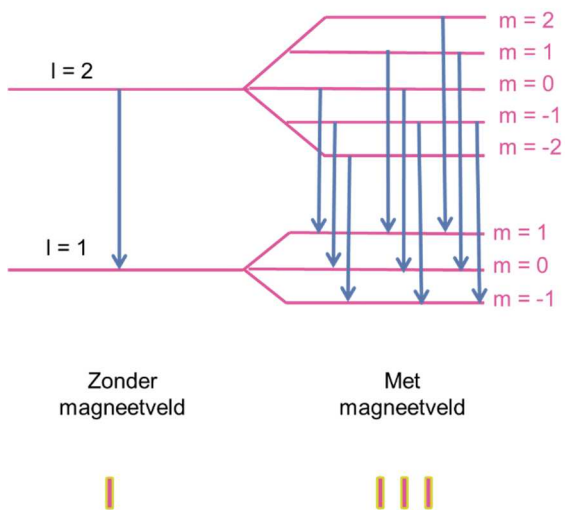


Figuur 94. De ellipsbanen die Sommerfeld voorstelde, uitgewerkt voor niveau 5.



Figuur 95. Het magnetisch kwantumgetal.

Meetkundig bedoelt hij dat er verschillende banen mogelijk zijn van gelijk energieniveau (n hetzelfde) en van gelijke ellipsvorm (l hetzelfde), maar gelegen onder een bepaalde hoek ten opzichte van de éne baan die er bestaat in afwezigheid van het magneetveld. Ook deze waarde is (uiteraard) gekwantiseerd. Beide tekeningen publiek domein.



Figuur 96. Verklaring van het Zeemaneffect door Sommerfeld

Sommerfeld legt uit waar de opgesplitste spectraallijnen van het Zeemaneffect vandaan komen door de energieniveaus binnen een atoom verder te verfijnen.



Figuur 97. Arnold Sommerfeld.

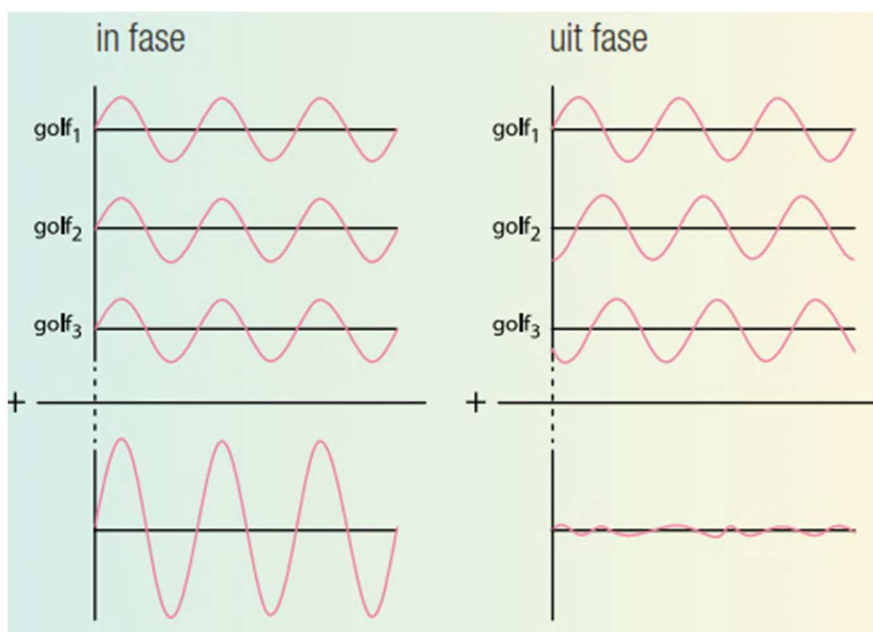
Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (5 december 1868, Königsberg, Pruisen – 26 april 1951, München, West-Duitsland) studeerde wiskunde en fysica aan de Albertina Universiteit van Königsberg, en promoveerde er in 1891. Zijn snor, zijn grote gestalte en een litteken op zijn gezicht ten gevolge van een schermduel deden hem op een kolonel van de Hussaren gelijken. Na zijn legerdienst vertrok hij naar de Universiteit van Göttingen en nam er in september 1894 een assistentschap op bij Felix Klein. In 1897 volgde hij Wilhelm Wien op als Professor in Wiskunde in de Bergakademie in Clausthal-Zellerfeld. In 1900 nam hij de positie op als Professor in Toegepaste Mechanica in Aken, en in 1906 verhuisde hij naar München.



Figuur 98. Sommerfeld in café Hofgarten

Dagelijks spendeerde Sommerfeld een uur in het café Hofgarten in München, waar een groep natuurkundigen, scheikundigen en kristallografen met hem discussieerde over het verloop van hun onderzoek.

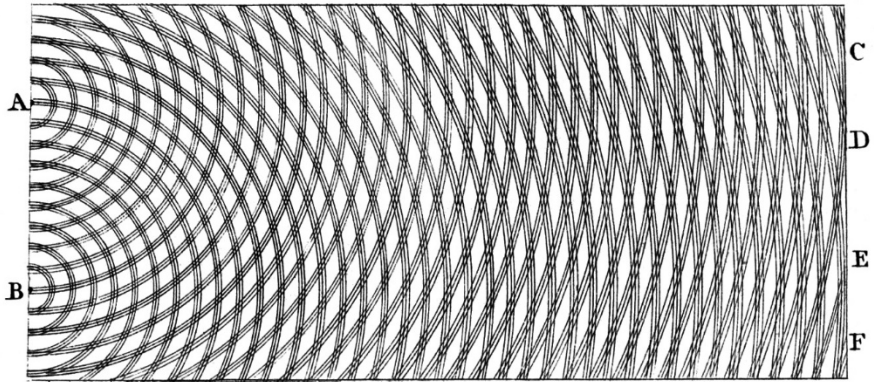
Sommerfeld toonde zich daar een uitstekende leraar en een schitterende promotor voor zijn studenten. Onder zijn promovendi waren vier Nobelprijswinnaars (Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Peter Debye, en Hans Bethe). Ook Linus Pauling en Isidor I. Rabi, werkten een tijd als postdoc in de groep van Sommerfeld. Veel van deze studenten hebben bovendien de Nobelprijswinnaars van de daaropvolgende generatie opgeleid. Enkel J.J. Thomson staat op eenzelfde hoogte.



Figuur 99. Het optellen van golven.

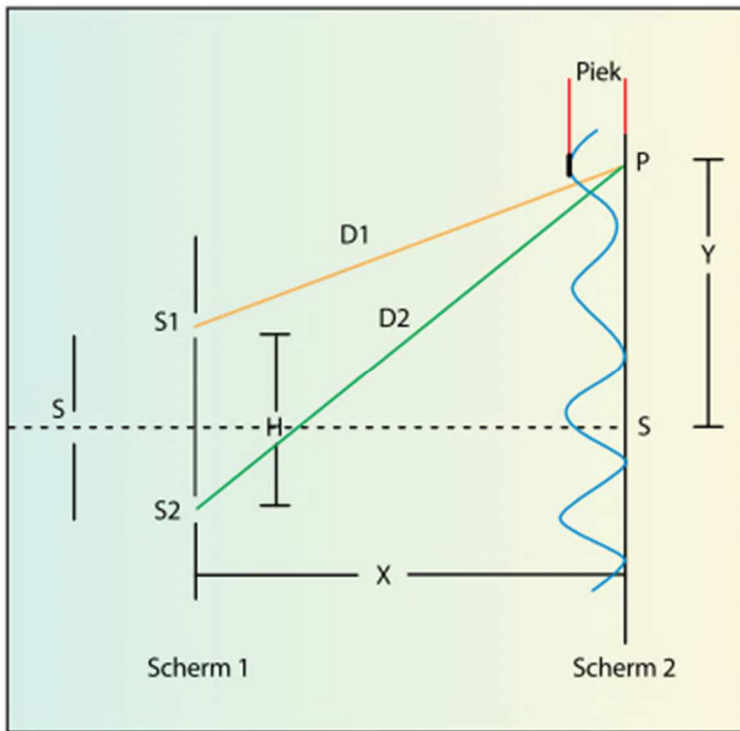
Het effect van de combinatie van golven kan je gemakkelijk afleiden uit de figuur.

Komen twee golven samen (zijn ze "in fase", zoals dat dan heet), dan tel je de amplitude op. Golven die netjes synchroon lopen, gaan mekaar versterken. Golven die niet synchroon lopen, zwakken mekaar af.



Figuur 100. Interferentie van twee lichtgolven volgens Young.

De originele tekening van Thomas Young uit zijn publicatie over zijn twee-spletenexperiment. De twee spleten waaruit het licht vertrekt, liggen op punten A en B. De franjes zijn te zien op punten C, D, E en F.

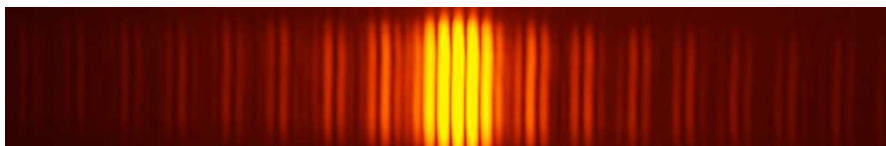


Figuur 101. Het twee-spletenexperiment van Young

Deze schets geeft op meetkundige wijze weer hoe de interferentiefranje ontstaan. Wanneer stralen D1 en D2 mekaar versterken, krijgen we een verlichte franje. Dit gebeurt wanneer hun lengteverschil overeenkomt met een geheel aantal golflengten:

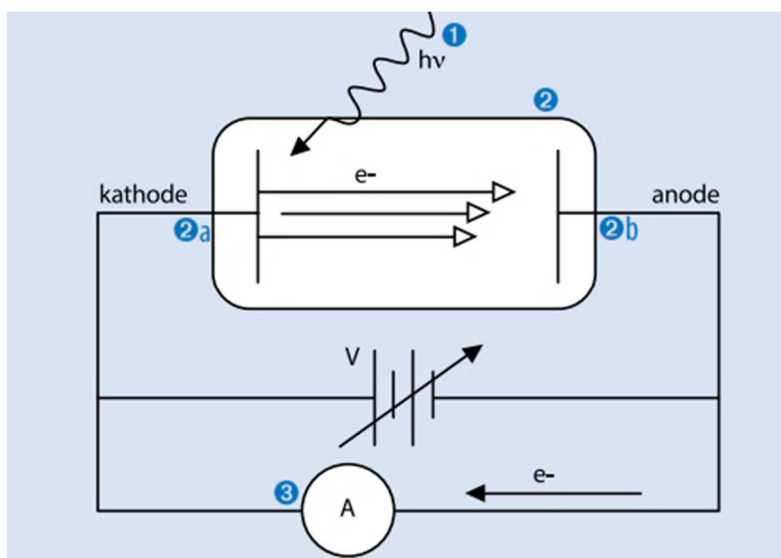
$$D2 - D1 = n\lambda$$

Zijn ze uit fase, dan neemt de intensiteit snel af, en bij een volledige opheffing van de twee golven krijgen we een zwarte zone. Met een beetje driehoeksmeetkunde kan je al snel de juiste positie van de franjes afleiden.



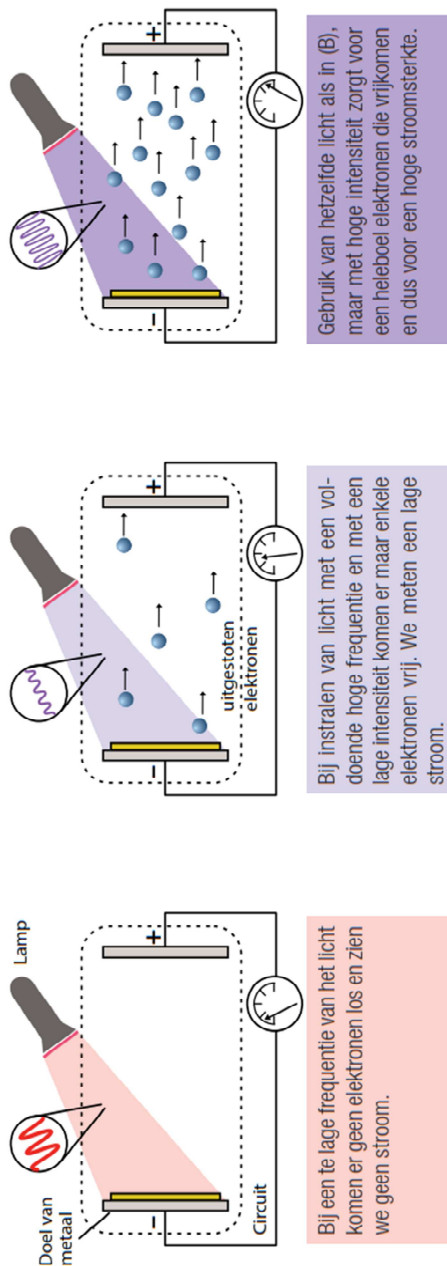
Figuur 102. Interferentiefranjies.

Het gebruikte licht is natriumlicht van 589 nm. De spleten zelf waren 0,08 mm wijd en de afstand tussen de spleten was 0,25 mm. Als projectiescherm (scherm twee uit de vorige figuur) diende een digitale camera op 15 cm van het scherm (1) met de spleten.

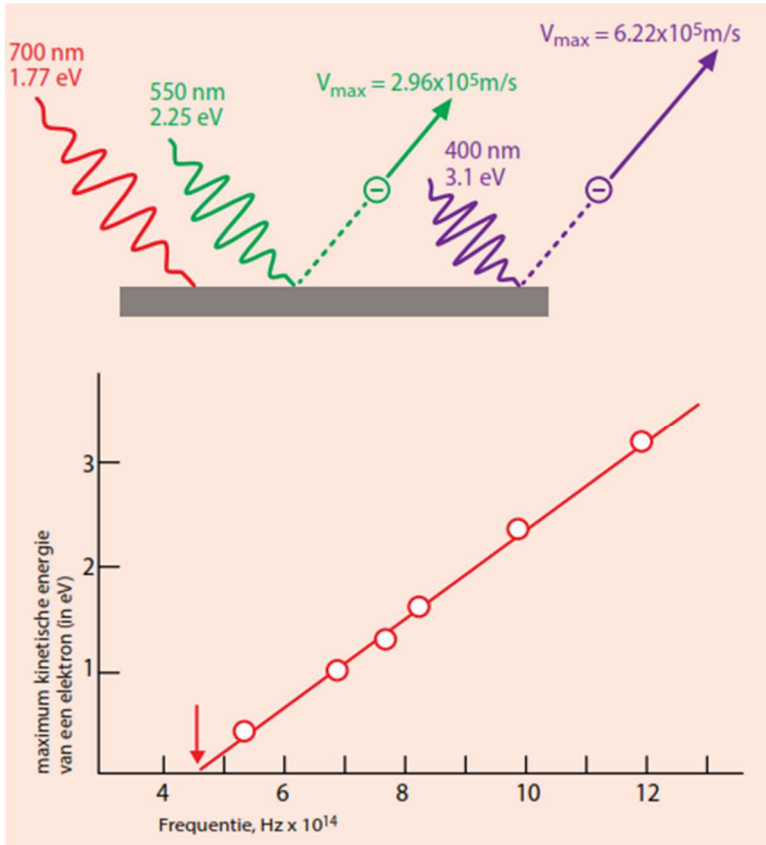


Figuur 103. Opstelling voor het onderzoek naar het foto-elektrisch effect.

Het toestel waarmee Lenard het foto-elektrisch effect onderzocht, bestaat uit een lichtbron (1), een vacuümbuis uit glas waarin zich twee metalen platen bevinden (2), en een meettoestel (3). De lichtstraal valt in op een van de twee metalen platen (2a), waaruit de elektronen worden losgemaakt. Deze plaat duiden we aan als kathode. Aan het andere eind van de buis bevindt zich de negatief geladen anode (2b). De stroom tussen anode en kathode wordt gemeten met een galvanometer en is een maat voor het aantal elektronen dat losgemaakt wordt door het licht. Door de lading op de anode te veranderen, kunnen bovendien de elektronen met te weinig kinetische energie worden teruggebogen. Zo krijgen we ook een beeld van de snelheid van de elektronen.



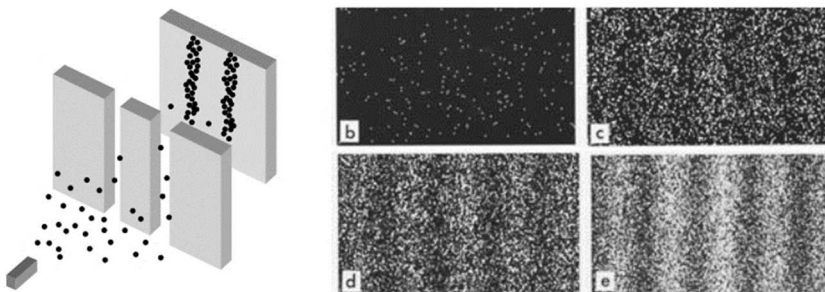
Figuur 104. De verklaring van Albert Einstein voor het foto-elektrisch effect.



Figuur 105. Bewijs voor Einsteins idee over het foto-elektrisch effect.

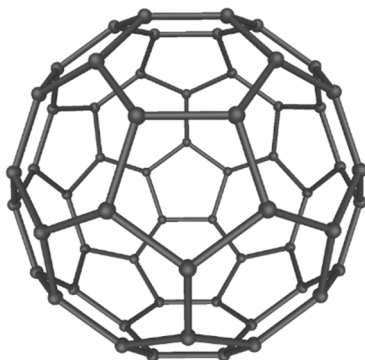
Bewijs voor de stelling van Einstein: het foto-elektrisch effect geeft een lineair verband tussen de kleur (en de frequentie) van het licht, en de productie van elektronen uit een metalen oppervlak.

700 nm: rood licht – 550 nm: groen licht – 400 nm violet licht.



Figuur 106. Twee-spletenexperiment met elektronen.

Dit is het beroemde experiment waarbij het interferentiepatroon van twee elektronenbundels wordt bepaald. Het experiment werd jarenlang louter als gedachte-experiment beschouwd, en het heeft om technische redenen tot 1989 geduurd voor de metingen ook effectief werden uitgevoerd.



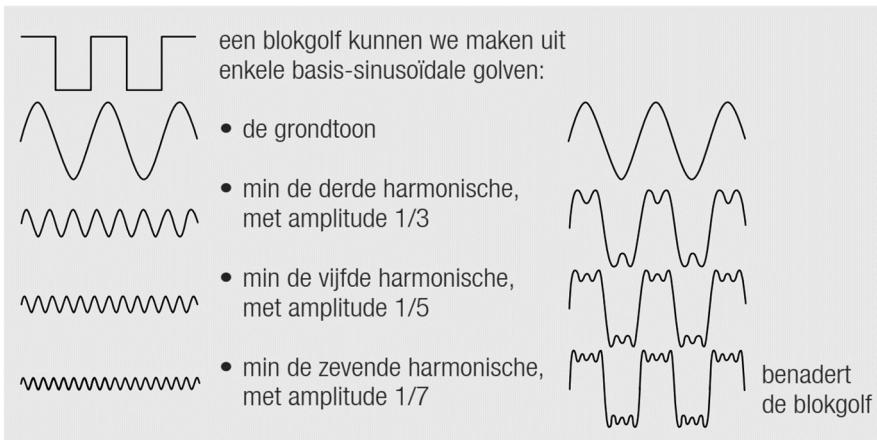
Figuur 107. Een buckyball

Tweede afgeleide Golffunctie

$$\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0$$

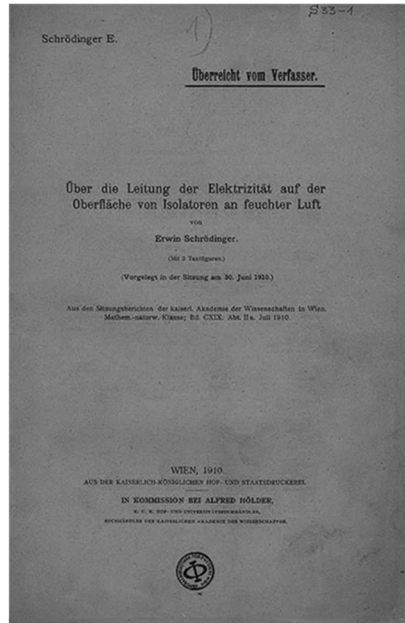
Positie Energie Potentiële energie

Figuur 108. De Schrödingervergelijking



Figuur 109. Fourier-analyse van een blokgolf

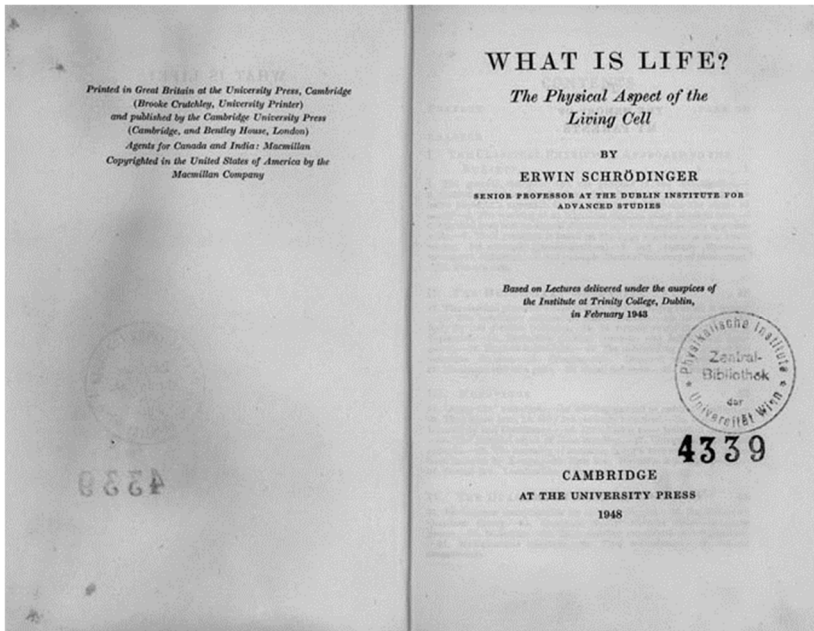
In dit voorbeeld zien we hoe een blokgolf kan bestaan als een superpositie (som) van eenvoudige (co)sinusfuncties.



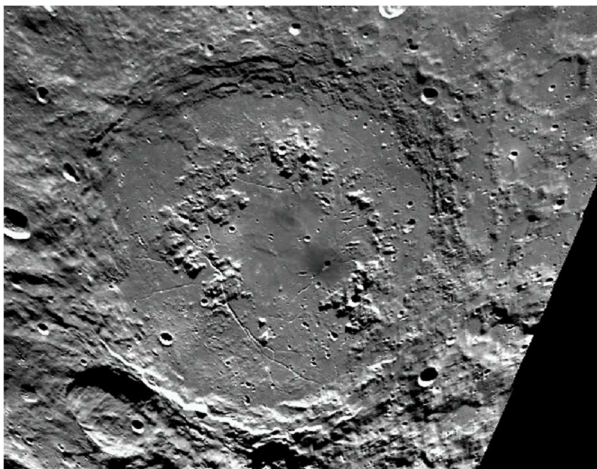
Figuur 110. Erwin Schrödinger



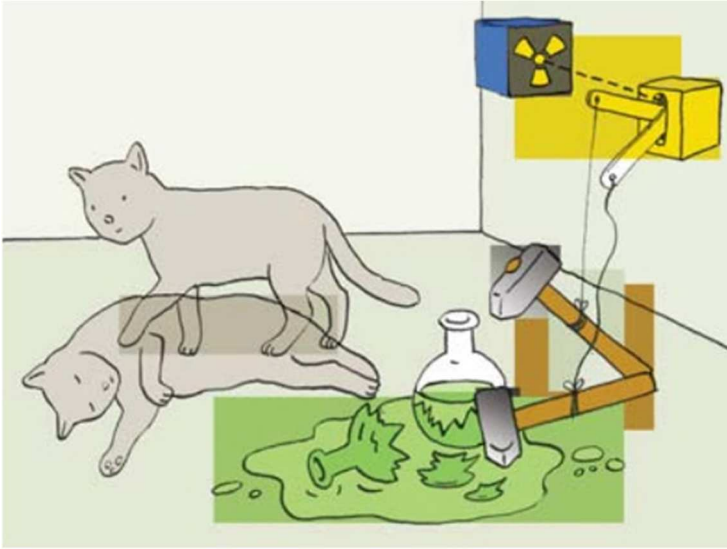
Figuur 111 Schrödinger op de Oostenrijkse 1000-schillingbiljetten



Figuur 112. Voorpagina van Erwin Schrödingers boek What is Life?



Figuur 113. Schrödingerkrater op de maan.

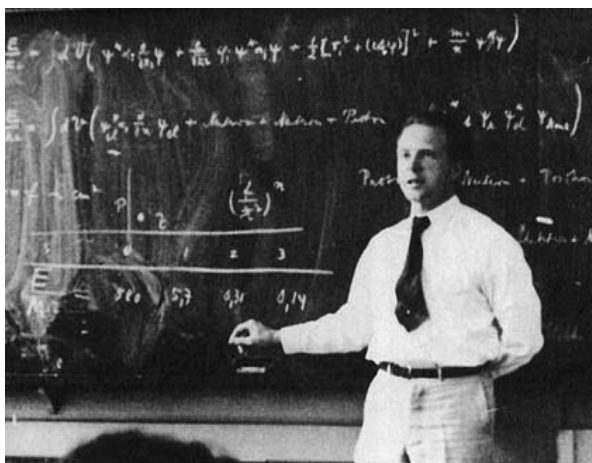


Figuur 114. Conceptuele voorstelling van de "kat van Schrödinger".

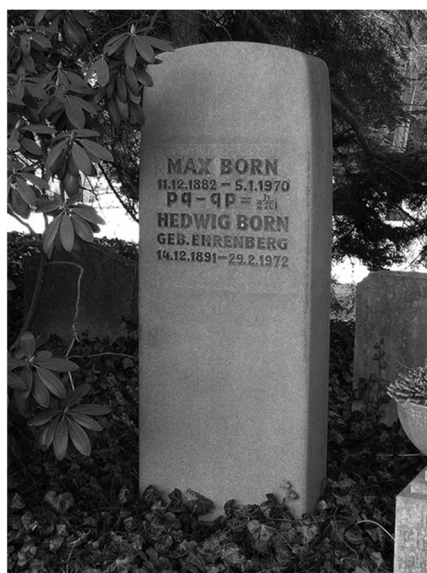


Figuur 115. Werner Karl Heisenberg

*5 december 1901, Würzburg, Koninkrijk Beieren, Duitse Keizerrijk - 1 februari
1976, München, Beieren, West-Duitsland*



Figuur 116. Heisenberg tijdens een college.



Figuur 117. Max Born

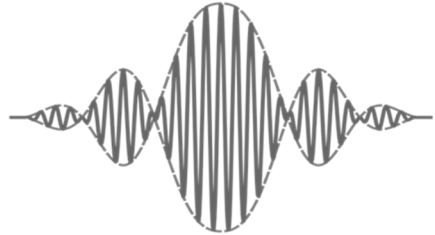
Born (Breslau, 11 december 1882 – Göttingen, 5 januari 1970) was een Duitse, en later, vanaf 1933, een Britse wis- en natuurkundige. In 1954 ontving hij de Nobelprijs voor Natuurkunde voor zijn waarschijnlijkheidsinterpretatie van de Schrödingervergelijking. Samen met zijn echtgenote ligt hij begraven op de begraafplaats Stadfriedhof in Göttingen, met op zijn grafsteen de fundamentele vergelijking van de kwantummechanica.



RECHERCHES SUR LA THÉORIE DES QUANTA

Par M. LOUIS DE BROGLIE

SOMMAIRE. — L'histoire des théories optiques montre que la pensée scientifique a longtemps hésité entre une conception dynamique et une conception ondulatoire de la lumière: ces deux représentations sont donc sans doute moins en opposition qu'on ne l'avait supposé et le développement de la théorie des quanta semble confirmer cette conclusion.

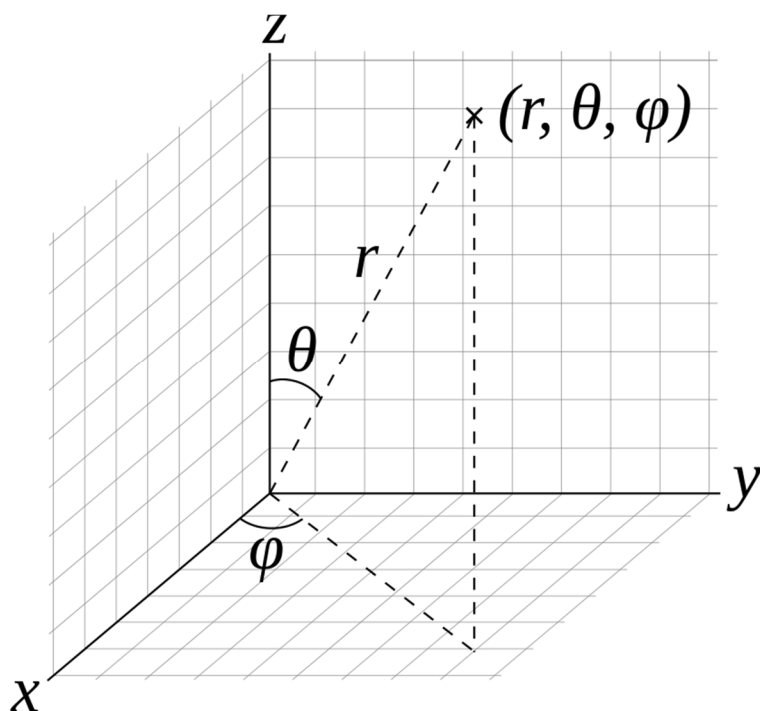


Figuur 118. Louis de Broglie

Links: Louis-Victor-Pierre-Raymond, 7e duc de Broglie (15 augustus 1892, Dieppe, Frankrijk – 19 maart 1987, Louveciennes, Frankrijk). Hij mocht in 1929 de Nobelprijs voor Natuurkunde ontvangen, nadat zijn hypothese over het golf-deeltjesgedrag van materie in 1927 door de Amerikaanse onderzoekers Clinton Davisson en Lester Gerner experimenteel bevestigd werd.

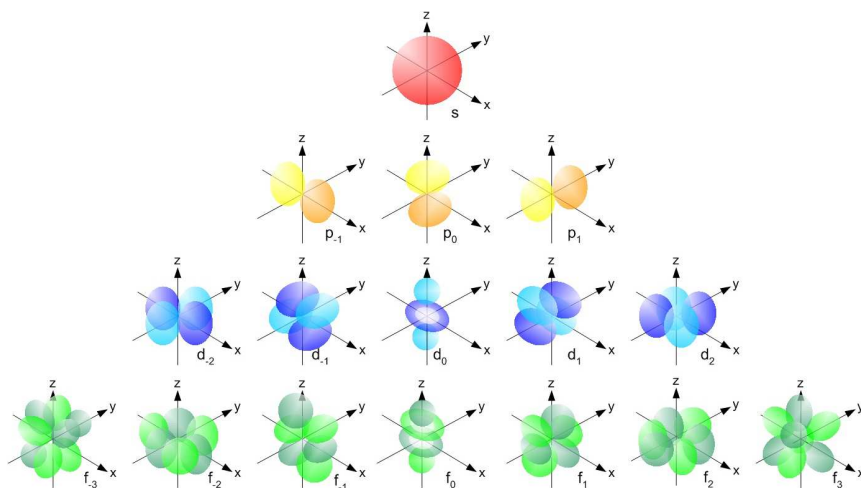
Rechtsboven: Abstract van de doctoraatsthesis van Louis de Broglie.

Rechtsonder: Golfpakketje.



Figuur 119. Cartesiaanse en sferische coördinaten

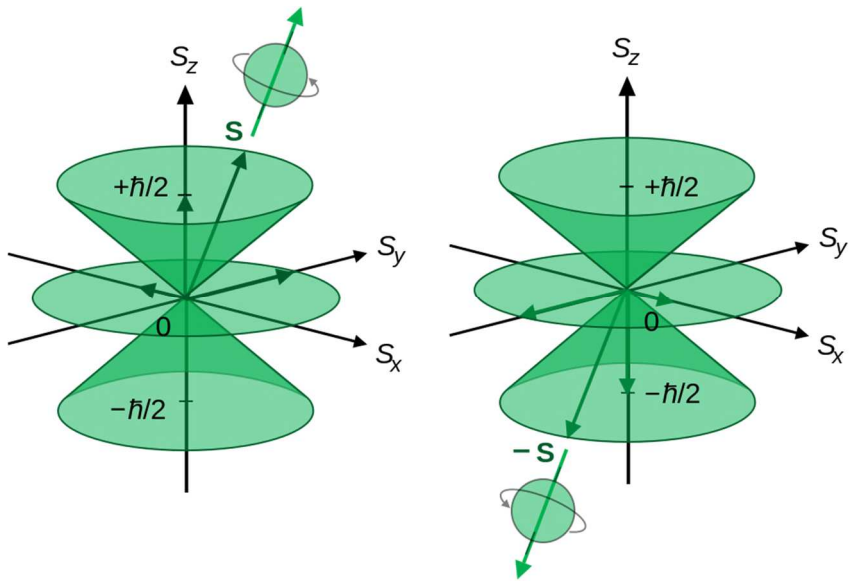
Net zoals je een punt in de ruimte kan aanduiden met de Cartesiaanse coördinaten $(x, y$ en $z)$, kan je dat punt even eenduidig beschrijven met de drie sferische coördinaten r, θ en φ . Hierbij is r de afstand tot de oorsprong van het assenkruis, en zijn θ en φ de hoeken tussen de assen en de rechte die de oorsprong met het punt verbindt.



Figuur 120. Vorm en oriëntatie van verschillende orbitalen.

Van boven naar beneden zien we de (enige) s-orbitaal (een bolvorm, die slechts één oriëntatie kent), de drie p-orbitalen, die zich langsheen de drie hoofdassen van de ruimte leggen, de vijf d-orbitalen (met complexe vormen) en de nog complexere f-orbitalen, waarvan er zeven vormen bestaan.

Zijn er nog meer orbitalen? Theoretisch wel: verdere ontwikkeling van de Schrödingervergelijking voor elektronen in een atoom levert nog g-orbitalen (9 varianten) enzovoort... In de praktijk hebben we echter nog geen enkel atoom ontdekt waarbij andere vormen en oriëntaties een rol spelen.



Figuur 121. Het spinkwantumgetal

Eerder beschreven we hoe het magnetisch kwantumgetal m de oriëntatie van de ellipsbanen (nu orbitalen) van Sommerfeld bepaalt. Deze figuur geeft aan hoe het vierde kwantumgetal aansluit op dat magnetische kwantumgetal.



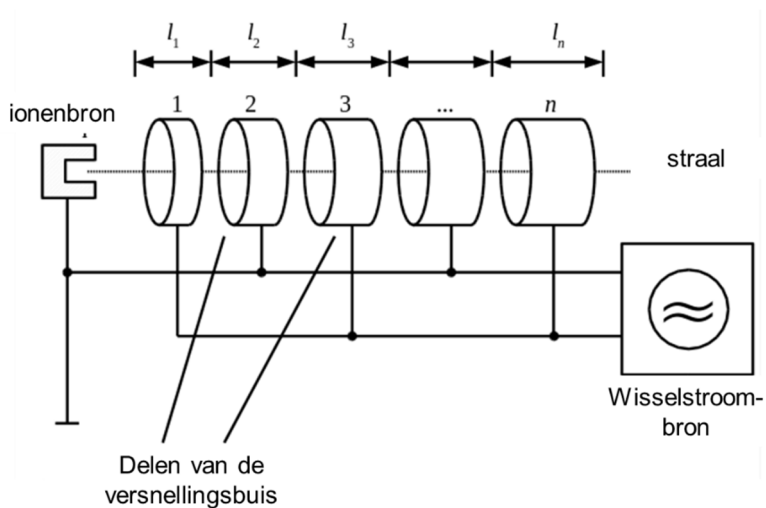
*Figuur 122. De International Bunsentagung on Radioactivity in Münster
(16-19 mei 1932).*

*Zittend, van links naar rechts: James Chadwick, Hans Geiger,
Ernest Rutherford, Stefan Meyer, Karl Przibram.
Staand, van links naar rechts: Georg de Hevesy, mevrouw Geiger,
Lise Meitner, Otto Hahn.*



Figuur 123. Rolf Widerøe

*11 juli 1902, Oslo/Kristiania, Noorwegen – 11 oktober 1996, Obersiggenthal,
Zwitserland, hier in 1954.*

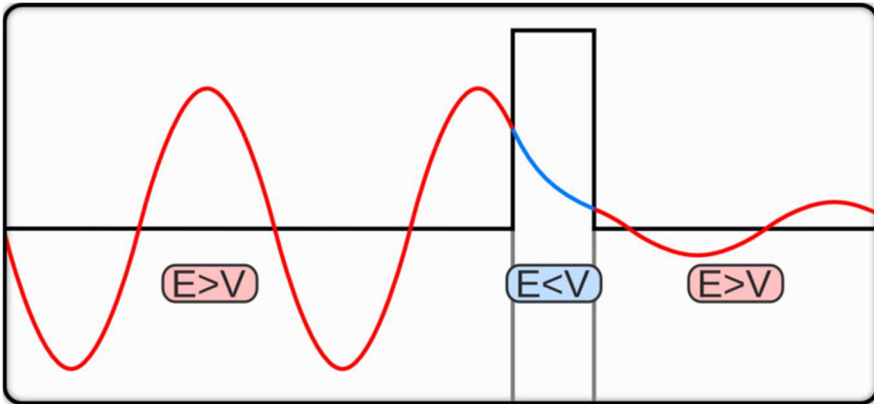


Figuur 124. De lineaire versneller – schematische opbouw.



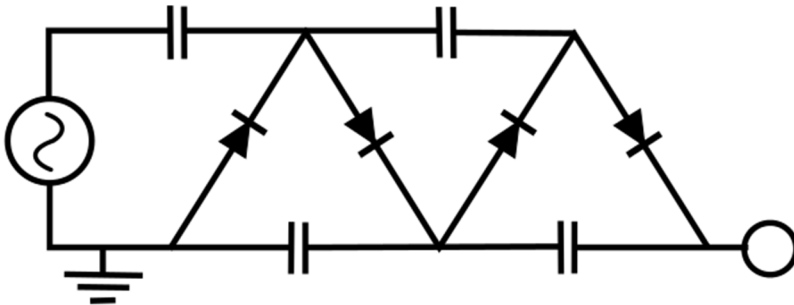
Figuur 125. Stanford Linear Accelerator Center

Moderne voorbeelden van dergelijke lineaire versnellers zijn de versneller van het Stanford Linear Accelerator Center (3,2 km lang) en de International Linear Collider (31 km lang), die nog in de ontwerpfase zit. De eerste versnelt elektronen en positronen tot 50 GeV (Giga-elektronVolt of 10^9 eV), de laatste zou tot 1 TeV (Tera-elektronVolt, 10^{12} eV) moeten gaan.



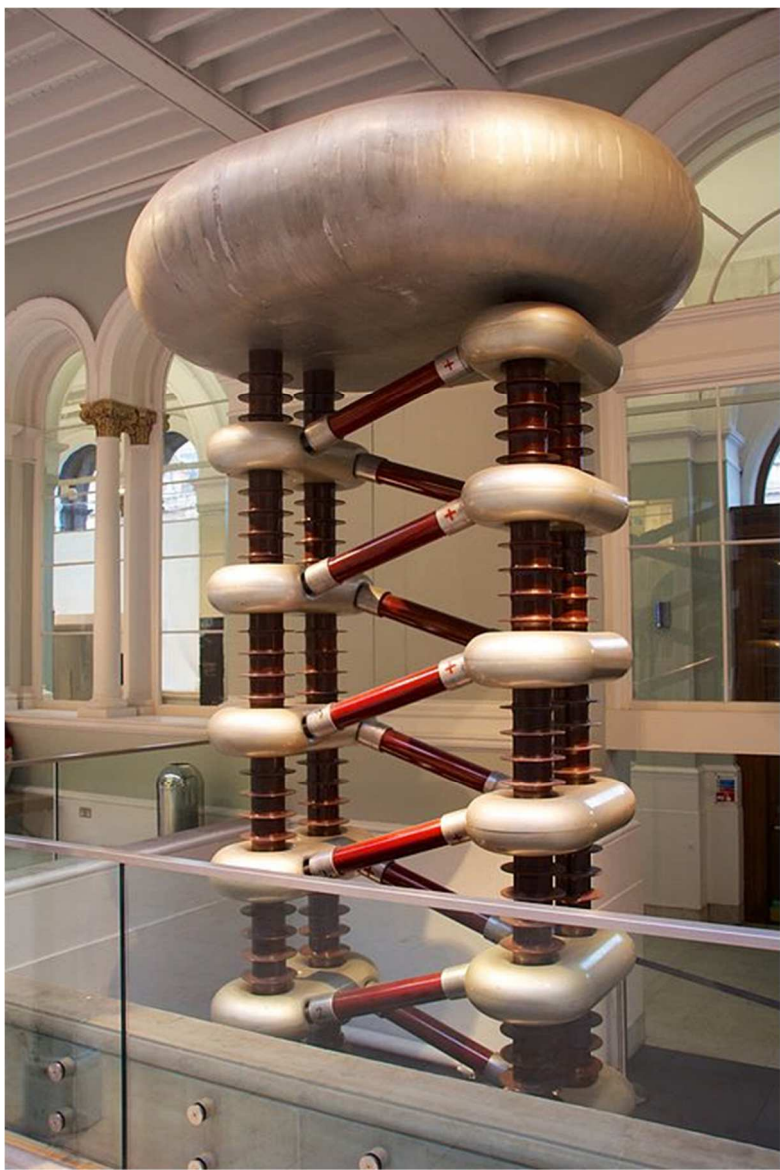
Figuur 126. Kwantumtunneling

Kwantumtunneling, zegt u? Dat is weer zo een vreemd, maar waargenomen effect van de kwantummechanica: deeltjes kunnen door een barrière heen, wanneer ze te weinig energie hebben om erover te gaan. Wanneer een deeltje opgesloten zit in een ruimte met niet al te dikke wanden, dan kan het hier dus uit ontsnappen, als had er zich een tunnel door de barrière gevormd. Opgelet – dit is enkel een flauwe manier van voorstellen: in werkelijkheid kunnen we het tunneleffect enkel goed uitleggen met behulp van de wiskundige benadering van de vergelijking van Schrödinger.



Figuur 127. De Cockcroft-Waltongenerator: elektrisch circuit

De Cockcroft-Waltongenerator is een elektrisch circuit dat in staat is om een hoge gelijkstroomspanning voort te brengen uit een wisselstroom met lage spanning. Het is het hart van de deeltjesversneller van de Brit John Douglas Cockcroft en de Ier Ernest Thomas Sinton Walton, die daarmee voor het eerst in het labo een atoomkern lieten desintegreren. Het circuit speelt ook een rol in fotomultipliers, laserprinters en kopieerapparaten.



Figuur 128. Cockcroft-Waltongenerator. tentoongesteld in het National Museum of Scotland.



Figuur 129. Cockcroft en Walton

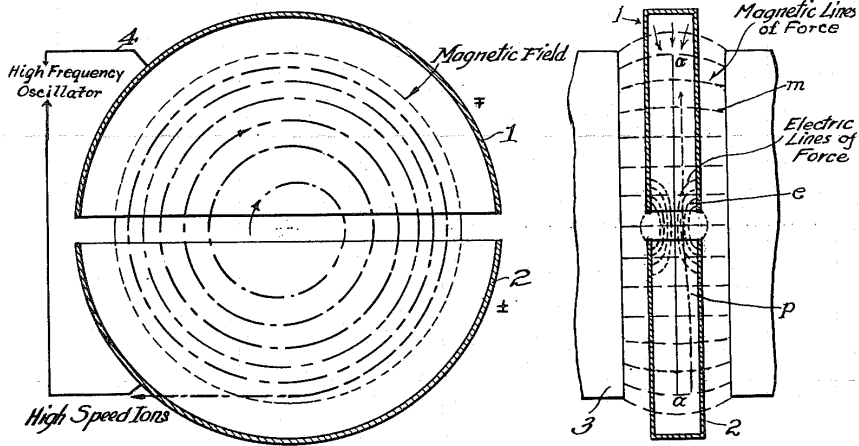
Links: Sir John Douglas Cockcroft (27 mei 1897, Todmorden, West Yorkshire, Groot-Brittannië - 18 september 1967, Cambridge, Groot-Brittannië).

Rechts: Ernest Walton, 6 oktober 1903, Abbeyside, Dungarvan, Ierland - 25 juni 1995, Belfast, Noord-Ierland, Groot-Brittannië).



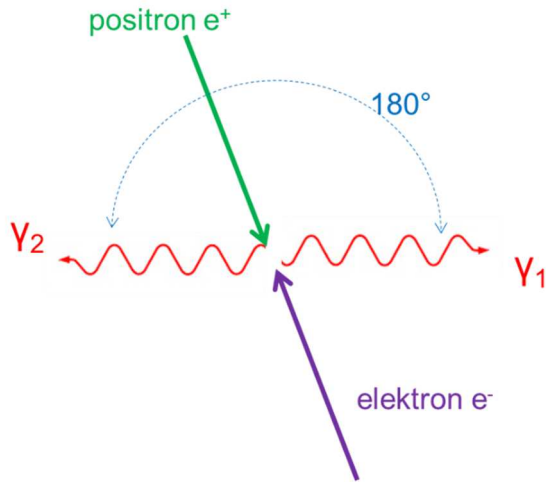
Figuur 130. Ernest Lawrence

Ernest Orlando Lawrence (8 augustus 1901, Canton South Dakota, USA – 27 augustus 1958, Palo Alto, Californië, USA) was een Amerikaans natuurkundige die bekend werd als ontwerper van het cyclotron. Tijdens het Manhattanproject (het Amerikaanse project om een atoombom te ontwikkelen) legde hij zich toe op het opzuiveren van uranium-isotopen. Hij kreeg in 1939 de Nobelprijs voor Natuurkunde voor zijn werk aan het cyclotron. Element nummer 103, lawrencium (Lr), is naar hem vernoemd.

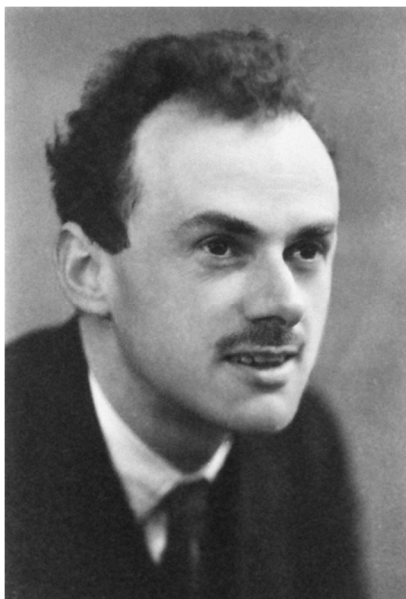


Figuur 131. Cyclotron van Lawrence.

Werking van het cyclotron, uit het originele octrooi van Lawrence. Het basisprincipe van de werking van dit toestel is dat een geladen partikel dat zich in een magnetisch veld bevindt, zich loodrecht op dit veld zal voortbewegen. Een cyclotron gebruikt holle metalen elektroden die de vorm hebben van halve schijven of "D's". In het centrum komt een bron van geladen deeltjes, die door de elektroden worden aangetrokken. Net zoals bij de lineaire versneller wisselt het elektrisch veld tussen beide D's, zodat de geladen deeltjes heen en weer vliegen tussen beide elektroden. Loodrecht op deze D's komt dan een magnetisch veld, waardoor de geladen deeltjes worden afgebogen. Al deze velden en krachten zorgen ervoor dat de geladen deeltjes in een spiraalvormige beweging naar buiten beginnen bewegen. Hogere snelheden worden bereikt hoe sterker het magnetische veld en hoe groter de omvang van het cyclotron, hoe sneller de deeltjes bewegen. Dat eerste cyclotron van Lawrence was ongeveer 30 cm in diameter met een veld van ongeveer een halve Tesla. Het versnelde protonen tot iets meer dan 1 MeV.



Figuur 132. Schematische weergave van de botsing van een elektron met een positron.



Figuur 133. Paul Dirac

Paul Adrien Maurice Dirac (8 augustus 1902, Bristol, Groot-Brittannië–20 oktober 1984 Tallahassee, Florida, USA) won de Nobelprijs voor Natuurkunde in 1933, samen met Erwin Schrödinger. Hoewel hij zijn academische carrière was begonnen als elektrisch ingenieur aan de Universiteit van Bristol, kwam zijn genie vooral in zijn theoretisch wiskundig werk tot volle bloei. In 1928 publiceerde hij een relativistische golfvergelijking, waarmee voor de eerste keer de speciale relativiteitstheorie wordt uitgewerkt in een kwantummechanische context.

In 1930 toonde hij aan dat de benaderingen van de kwantummechanica door Heisenberg (de matrixmechanica) en door Schrödinger (golf functies) gelijkwaardig zijn. Ook later bleef Dirac verder werken aan de theoretische benadering van de kwantummechanica. Hij werd daarbij een groot voorbeeld voor heel wat theoretici van na de Tweede Wereldoorlog, zoals Richard Feynman. Hij was een van de grootste theoretische genieën van de twintigste eeuw. Tussen 1932 en 1969 bekleedde hij de Lucasian Chair voor Wiskunde aan de Universiteit van Cambridge (zoals Newton zelf lang voorheen, en Stephen Hawking tussen 1979 en 2009).

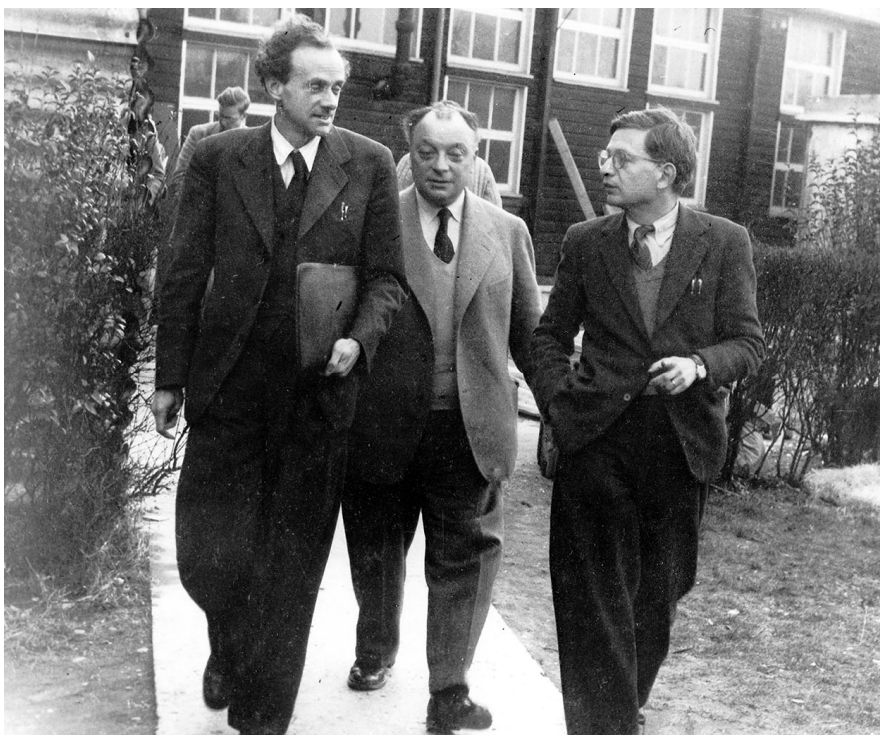
I

THE PRINCIPLE OF SUPERPOSITION

1. The need for a quantum theory

CLASSICAL mechanics has been developed continuously from the time of Newton and applied to an ever-widening range of dynamical systems, including the electromagnetic field in interaction with matter. The underlying ideas and the laws governing their application form a simple and elegant scheme, which one would be inclined to think could not be seriously modified without having all its attractive features spoilt. Nevertheless it has been found possible to set up a new scheme, called quantum mechanics, which is more suitable for the description of phenomena on the atomic scale and which is in some respects more elegant and satisfying than the classical scheme. This possibility is due to the changes which the new scheme involves being of a very profound character and not clashing with the features of the classical theory that make it so attractive, as a result of which all these features can be incorporated in the new scheme.

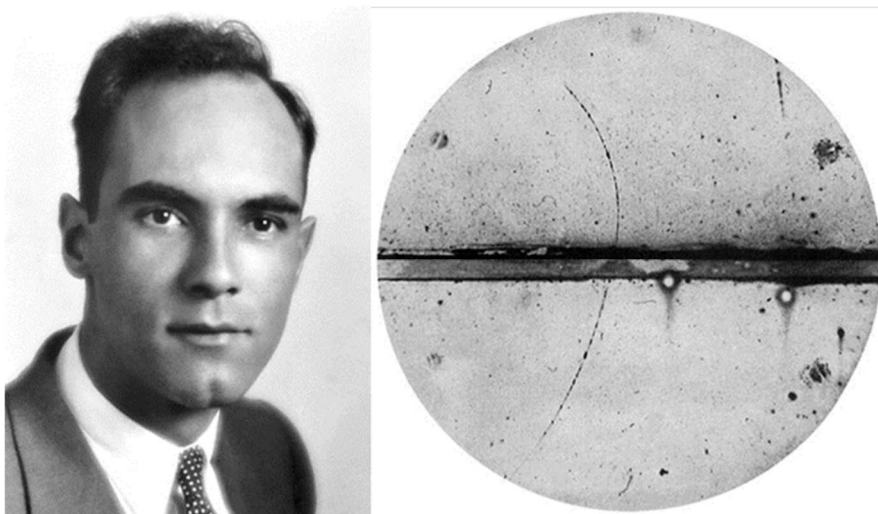
The necessity for a departure from classical mechanics is clearly shown by experimental results. In the first place the forces known in classical electrodynamics are inadequate for the explanation of the remarkable stability of atoms and molecules, which is necessary in order that materials may have any definite physical and chemical properties at all. The introduction of new hypothetical forces will not save the situation, since there exist general principles of classical mechanics, holding for all kinds of forces, leading to results in direct disagreement with observation. For example, if an atomic system has



Figuur 134. Drie kwantumgeleerden.

Van links naar rechts: Paul Dirac, Wolfgang Pauli (1900-1958) en Rudolf Peierls (1907-1994) in Birmingham.

Op de vraag wat zijn fundamentele filosofie in het leven inhield, moet Dirac ooit geantwoord hebben: "Dat de natuurwetten in mooie vergelijkingen kunnen gevat worden." Toen Dirac op een keer was uitgenodigd in de Sovjetunie kreeg hij de vraag wat hij dacht over poëzie. Zijn antwoord was: "In de wetenschappen probeert men iets te vertellen wat niemand nog weet op een zodanige manier dat iedereen het verstaat. Bij poëzie is het net omgekeerd." Een vreemde man, zegt u? Neem het van Einstein aan. Die zei ooit over Dirac: "This balancing on the dizzying path between genius and madness is awful."



Figuur 135. Carl Anderson.

Links: Carl Anderson bij het ontvangen van zijn Nobelprijs in 1936. Rechts: Nevelkamerobservatie van het positron door Carl Anderson. Twee sporen schieten weg in tegengestelde richting



Figuur 136. Patrick Blackett.

Patrick Maynard Stuart Blackett, (18 November 1897, London, Groot-Brittannië – 13 juli 1974, London, Groot-Brittannië) startte zijn loopbaan in de Britse marine. Tijdens de Eerste Wereldoorlog diende hij op de HMS Carnarvon (Figuur 137) en de HMS Barham (Figuur 138) als aspirant-officier en later als onderluitenant.

Hij werkte er onder andere een toestel uit om de mate van verandering van de kompaspeiling van het doelwit te meten om de trefzekerheid te verhogen, een toestel waarop de Royal Navy achteraf een patent nam. Blackett was vooral bezorgd over de slechte kwaliteit van de artillerie vergeleken met die van de vijand, en begon op eigen houtje wetenschappelijke handboeken rond het thema te bestuderen.



Figuur 137. De HMS Carnarvon



Figuur 138. De HMS Barham (in de jaren 1930)

Hij werd gepromoveerd tot luitenant in mei 1918, en trok in januari 1919 op bevel van de Britse legerleiding naar de Universiteit van Cambridge om zijn opleiding af te werken. Blackett raakte onder de indruk van het prestigieuze Cavendish Laboratory, en verliet de marine om wiskunde en natuurkunde te studeren aan Cambridge. Na zijn afstuderen werkte hij tien jaar in het Cavendish Lab.

Rutherford had in 1919 ontdekt dat de kern van het stikstofatoom kan uiteenvallen.

Hij vroeg Blackett nu om met een nevelkamer zichtbare sporen van deze desintegratie te vinden. Tegen 1924 had de man 23 000 foto's met in totaal 415 000 sporen van geïoniseerde deeltjes genomen. Acht daarvan waren gevorkt, en daaruit bleek dat bij de botsing tussen een alfadeeltje en een stikstofatoom eerst een fluoratoom werd gevormd, dat daarna uiteenviel in een zuurstofatoom en een proton. In 1932 en 1933 werkte hij samen met Giuseppe Occhialini. Samen ontdekten ze sporen van het positron in hun nevelkamer.

Na zijn werk bij Rutherford in Cambridge verhuisde hij voor vier jaar naar de Universiteit van Londen als hoogleraar natuurkunde. In 1937 verhuisde hij naar de Victoria Universiteit van Manchester (waar Rutherford zelf nog had gewerkt), waar hij een groot internationaal onderzoekslaboratorium op poten zette. In 1947 introduceerde Blackett een theorie waarmee hij de sterkte van het aardmagnetisch veld kon verklaren als functie van de rotatie, in de hoop om zo de elektromagnetische kracht en de zwaartekracht te verenigen. Zijn werk bracht hem naar het gebied van de geofysica, waar hij uiteindelijk hielp om gegevens rond paleomagnetisme te analyseren en finaal ook sterke bewijzen te vinden voor de theorie van de continentale drift.

In 1948 ontving hij de Nobelprijs voor natuurkunde voor zijn onderzoek naar kosmische straling. Patrick Blackett werd in 1953 aangesteld tot hoofd van de Afdeling Natuurkunde van het Imperial College in Londen. Hij trok zich uit het actieve leven terug in juli 1963.



Figuur 139. Baron Ernest Rutherford of Nelson and Cambridge



The RAPE of BELGIUM

AS witnessed by Hugh Gibson, First Secretary of our Legation in Brussels, when the Germans broke through Belgium.

His personal diary—the day to day history of all that he saw—can be given you now that the seal of diplomatic neutrality is broken.

The opening instalment appeared in yesterday's Sunday Tribune—a new chapter will be published daily and Sunday for about six weeks. Read to-day's (yesterday's if you can still get a copy), and to make sure of reading all of it leave an order with your newsdealer now.

—NOTE—

This remarkable story will appear daily and Sunday in *The Tribune* over a period of about six weeks. *The Tribune's* Circulation Department will receive subscriptions for the length of the story, and will mail the *Daily* and *Sunday Tribune* during its run for the special price of \$1.25. This is a real opportunity. Notify us to-day!

Figuur 140. The Rape of Belgium: of wat de pers daarvan maakte.

HOW THE HUN HATES!



THE HUNS CAPTURED SOME OF OUR FISHERMEN IN THE NORTH SEA AND TOOK THEM TO SENNELAGER. THEY CHARGED THEM WITHOUT A SHRED OF EVIDENCE WITH BEING "MINE LAYERS." THEY ORDERED THEM TO BE PUNISHED WITHOUT A TRIAL.

THAT PUNISHMENT CONSISTED IN SHAVING ALL THE HAIR OFF ONE SIDE OF THE HEAD AND FACE.

THE HUNS THEN MARCHED THEIR VICTIMS THROUGH THE STREETS AND EXPOSED THEM TO THE JEERS OF THE GERMAN POPULACE.

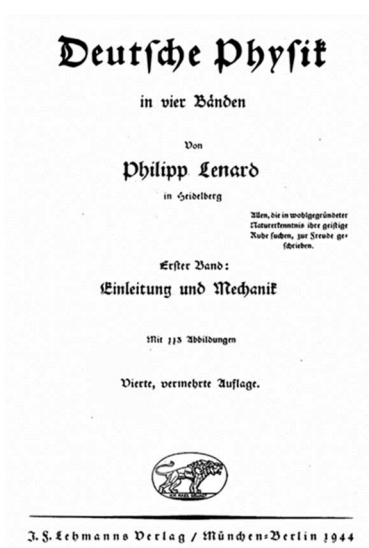
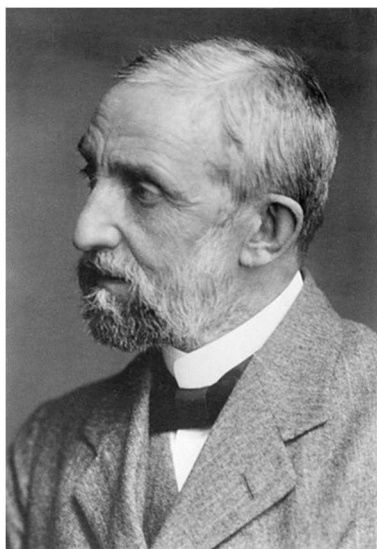
BRITISH SAILORS! LOOK! READ! AND REMEMBER!

THE SANDSFIELD PRINTING CO. LTD. LONDON

Figuur 141. Britse oorlogspropaganda uit 1917



Figuur 142. De restanten van de beroemde bibliotheek van Leuven.



Figuur 143. Philipp Lenard en zijn Deutsche Physik

Philipp Eduard Anton von Lenard (7 juni 1862, Pressburg, Hongaarse koninkrijk, Oostenrijkse Keizerrijk – 20 mei 1947, Messelhausen, Duitsland) op zijn 80ste verjaardag. Lenard won de Nobelprijs voor Natuurkunde in 1905 voor zijn onderzoek naar de eigenschappen van kathodestralen. De familie Lenard kwam oorspronkelijk uit Tirol en behoorde tot de Duitstalige bevolking in Pressburg (vandaag Bratislava in Slowakije). Hij studeerde fysica en chemie in Wenen en Budapest tussen 1880 en 1882, en trok daarna naar Heidelberg en Berlijn, waar hij respectievelijk werkte bij Robert Bunsen en Hermann von Helmholtz. Na omzwervingen in Aken, Bonn, Breslau en Kiel kreeg hij in 1907 een positie aan de Universiteit van Heidelberg als hoofd van het naar hem genoemde Philipp Lenard-instituut. Tijdens zijn carrière werd hij de actieve pleitbezorger van de Deutsche Physik-beweging. Hij gaf een handboekenreeks uit onder diezelfde benaming, en schreef een tekst (Grosse Naturforscher) waarin hij zijn ideeën over het leven van grote wetenschappers uit de geschiedenis weergaf (het boek bevat geen letter over Einstein, Curie, of enige andere twintigste-eeuwse natuurkundige). In 1931 legde hij zijn ambt van hoogleraar in theoretische fysica aan de Universiteit van Heidelberg neer, maar bleef aan de instelling verbonden tot de geallieerden hem in 1945 definitief verwijderden.



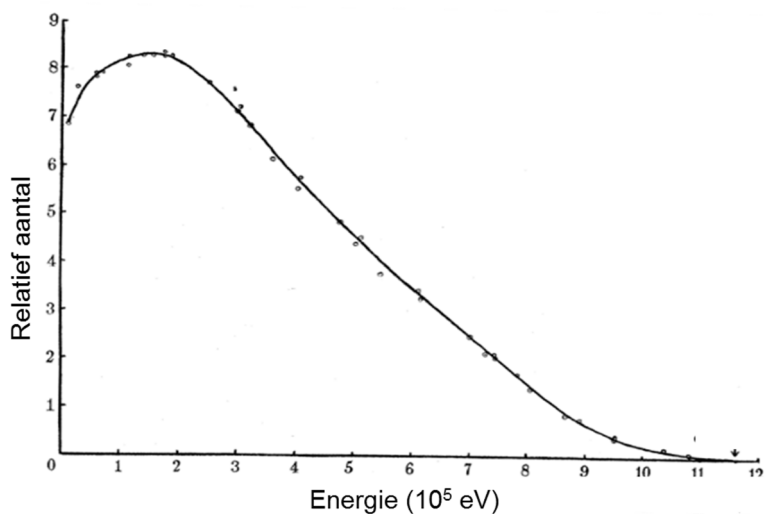
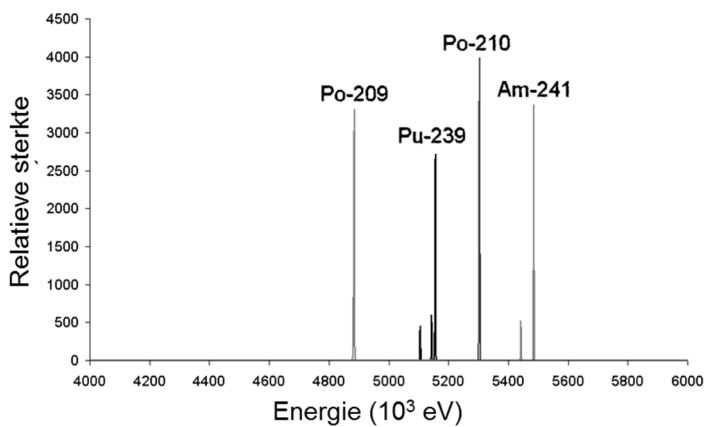
Figuur 144. Heisenberg en Bohr in 1934

Toen Heisenberg in 1941 zijn jarenlange vriend Niels Bohr ontmoette in het bezette Kopenhagen, was deze laatste geschokt om te horen dat Heisenberg meewerkte met de pogingen van de nazi's om een atoombom te maken. Het nieuws sijpelde door naar de geallieerden (via Bohr) en zorgde ervoor dat de Amerikanen hun Manhattanproject, rond de ontwikkeling van een atoombom, versnelden.

In 1944 gaf Heisenberg een lezing in het neutraal gebleven Zwitserland. In het publiek zat een Amerikaans agent, voormalig baseball catcher Moe Berg, gereed met een wapen om Heisenberg ter plekke neer te schieten als hij zou laten blijken dat Duitsland (bijna) klaar zou zijn met hun versie van de atoombom.



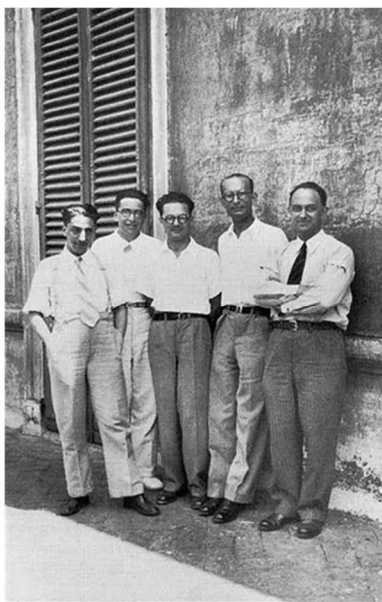
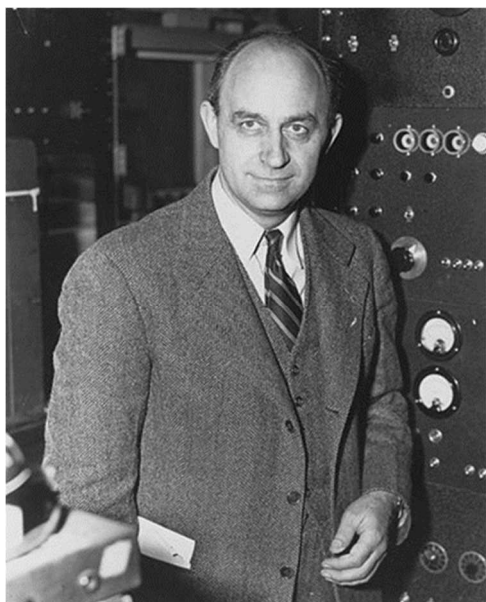
Figuur 145. De schoepen van een stoomturbine



Figuur 146. Energiespectra van alfastralers en een bètastraler

Bovenaan: Nauwe energiespectra van vier alfastralers (van links naar rechts: polonium-209, plutonium-239, polonium-210 en americium-241).

Onderaan: Breed energiespectrum van bismuth-210 (ofwel Radium E zoals het toentertijd werd genoemd), gemeten en gepubliceerd door G.J.Neary.

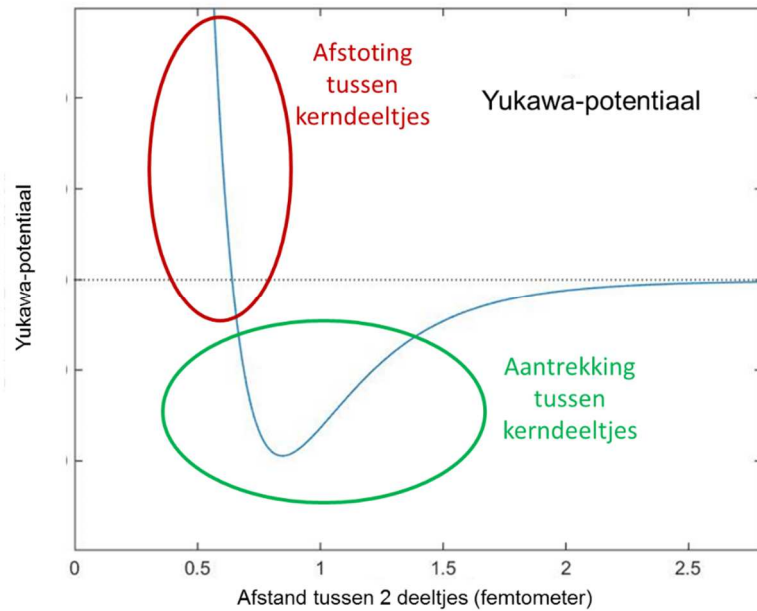


Figuur 147. Enrico Fermi

Links: Enrico Fermi (29 september 1901, Rome, Italië - 28 november 1954, Chicago, Illinois, United States), winnaar van de Nobelprijs Natuurkunde in 1938.

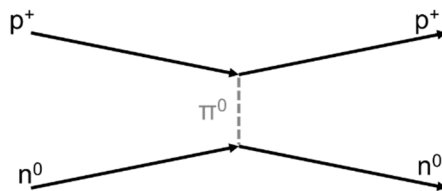
Rechts: Fermi en zijn studenten (de Via Panisperna-boys) op de binnenplaats van het Romeinse Instituut voor Natuurkunde aan de Via Panisperna, rond 1934. Het zou in dit instituut zijn, dat Fermi op een avond tijdens een discussie de term neutrino moet hebben bedacht. Van links naar rechts: Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti en Fermi zelf.

Fermi schreef rond het neutrino in 1934 een paper, waarin hij Pauli's neutrino met Paul Dirac's positron koppelde en zo voorzag in een solide theoretische basis voor toekomstig onderzoek naar het neutrino. Het vakblad Nature wees echter Fermi's paper en zei dat de theorie 'te ver van de realiteit' was. Hij stuurde zijn publicatie dan maar ingediend bij een Italiaans tijdschrift, dat het aanvaardde, maar het algemene gebrek aan interesse in zijn theorie zorgde ervoor dat hij koos voor een carrière in experimentele fysica.



Figuur 148. Grafiek van de Yukawapotential

Voor zeer kleine afstanden moet deze potentiaal nog worden aangevuld met een tegengestelde term... zoals gesteld in de tekst en te zien op bovenstaand diagram stoten kerndeeltjes op heel korte afstand mekaar weer af.



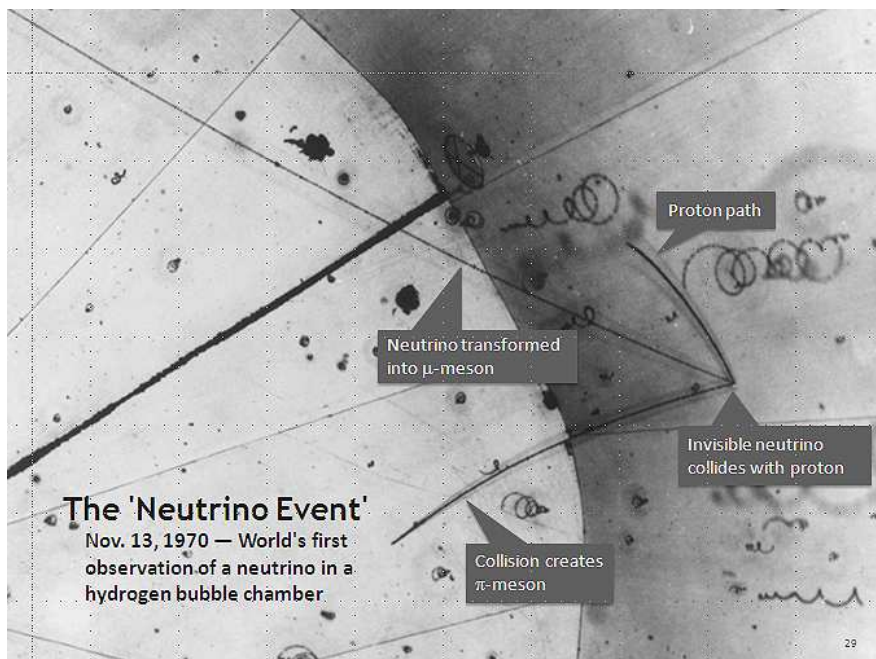
Figuur 149. Feynmandiagram

Interacties tussen subatomaire deeltjes worden vaak voorgesteld met behulp van een zogeheten Feynmandiagram (naar de bedenker, fysicus Richard Feynman) waaruit de interactie tussen, in dit geval, een proton en een neutron blijkt: via uitwisseling van een pion.



Figuur 150. Hideki Yukawa

Hideki Yukawa (23 januari 1907, Tokyo, Japan – 8 september 1981, Kyoto, Japan) werd geboren als Hideki Ogawa als vijfde in een gezin van zeven kinderen. Hideki's vader twijfelde nog om hem naar de universiteit te laten gaan, "omdat hij niet even briljant was als student als zijn oudere broers". Toen zijn schooldirecteur dit hoorde, bood deze aan Hideki desnoods te adopteren, en hem zelf naar de universiteit te sturen omwille van zijn groot potentieel in wiskunde. De jongeman koos uiteindelijk voor een carrière in theoretische natuurkunde en kon bij zijn afstuderen in 1929 meteen aanblijven als onderwijzend personeel aan de Universiteit van Kyoto. In 1932 trouwde hij met Sumi Yukawa. Volgens de Japanse traditie wordt een aanstaande schoonzoon uit een gezin met vele zonen door de vader van de bruid, indien die geen zonen heeft, geadopteerd. Zo ook Hideki Ogawa, die daardoor de familienaam Yukawa overnam. In 1933 werd hij assistant professor aan de Universiteit van Osaka. Daar publiceerde hij in 1935 zijn mesontheorie.



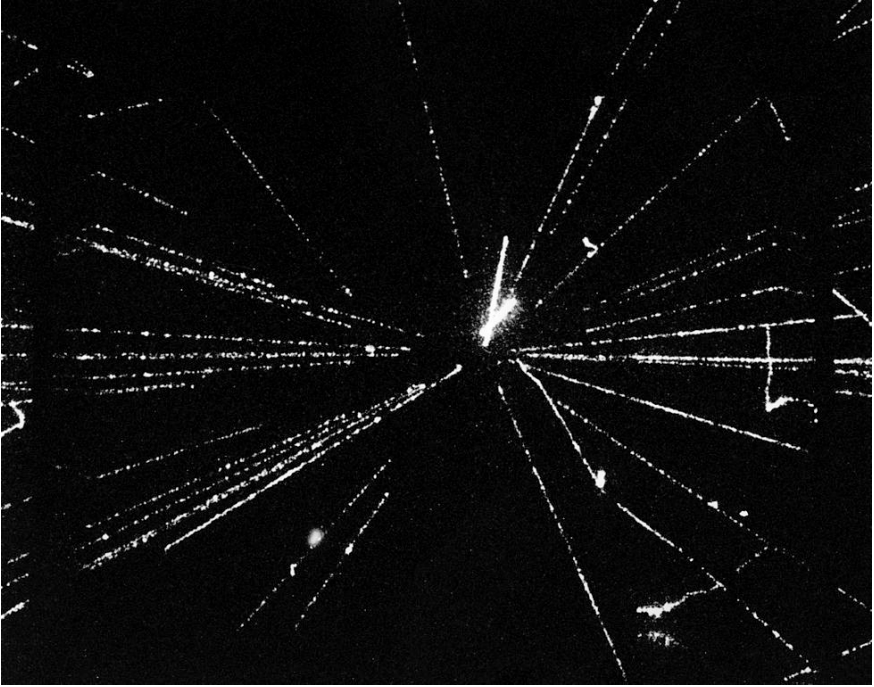
Figuur 151. Eerste observatie van een neutrino in een bellenvat, op 13 november 1970.

Het eerst onzichtbare neutrino raakt een proton (op het punt rechts op foto), waardoor het verandert in een muon of μ -meson (de lange lijn van rechts naar linksboven op de foto). De korte kromme is de baan van het proton dat net botste met het neutrino. Het derde spoor, naar linksonder, is getrokken door een pion of π -meson, ontstaan ten gevolge van de botsing.



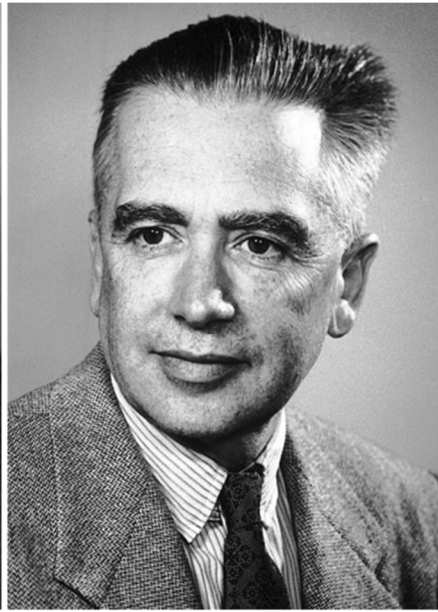
Figuur 152. De bellenkamer Gargamelle

Dit was een apparaat met een diameter van haast 2 m en een lengte van 4,8 m, was in gebruik op het CERN tussen 1970 en 1978. Het was gevuld met 12 m³ Halon 1301 (CF₃Br). Door deze zwaardere vloeistof te gebruiken in plaats van het zeer lichte waterstof (H₂), konden de onderzoekers met Gargamelle veel gemakkelijker het verschil zien tussen muonen en pionen.



Figuur 153. Botsing tussen een proton en een antiproton

Dit beeld is waargenomen met een streamer chamber, een variant op de klassieke vonkenkamer (1982, CERN, Zwitserland).



LETTERS TO THE EDITOR

947

Observation of Antiprotons*

OWEN CHAMBERLAIN, EMILIO SEGRÈ, CLYDE WIEGAND,
AND THOMAS YPSILANTIS

*Radiation Laboratory, Department of Physics, University of
California, Berkeley, California*
(Received October 24, 1955)

ONE of the striking features of Dirac's theory of the electron was the appearance of solutions to his equations which required the existence of an antiparticle, later identified as the positron.

The extension of the Dirac theory to the proton requires the existence of an antiproton, a particle which bears to the proton the same relationship as the positron to the electron. However, until experimental proof of the existence of the antiproton was obtained, it might be questioned whether a proton is a Dirac par-

Figure 1 shows a schematic diagram of the apparatus. The Bevatron proton beam impinges on a copper target and negative particles scattered in the forward direction with momentum 1.19 BeV/c describe an orbit as shown in the figure. These particles are deflected 21° by the field of the Bevatron, and an additional 32° by magnet $M1$. With the aid of the quadrupole focusing magnet $Q1$ (consisting of 3 consecutive quadrupole magnets) these particles are brought to a focus at counter $S1$, the first scintillation counter. After passing through counter $S1$, the particles are again focused (by $Q2$), and deflected (by $M2$) through an additional angle of 34° , so that they are again brought to a focus at counter $S2$.



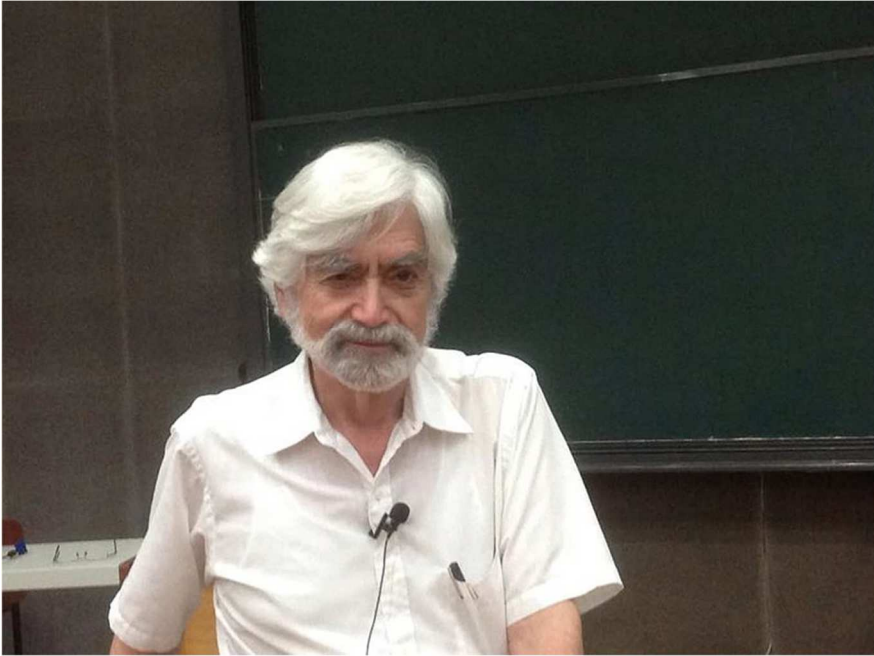
Figuur 154. Chamberlain en Segrè vinden antiprotonen

(Links) Owen Chamberlain (10 juli 1920, San Francisco, Californië, VS – 28 februari 2006, Berkeley, Californië, VS) en (rechts) Emilio Gino Segrè (1 februari 1905, Tivoli, Italië – Lafayette (Californië), 22 april 1989) kregen in 1959 de Nobelprijs voor Natuurkunde voor de ontdekking van het antiproton. Onderaan de cruciale publicatie in *Physical Review*.



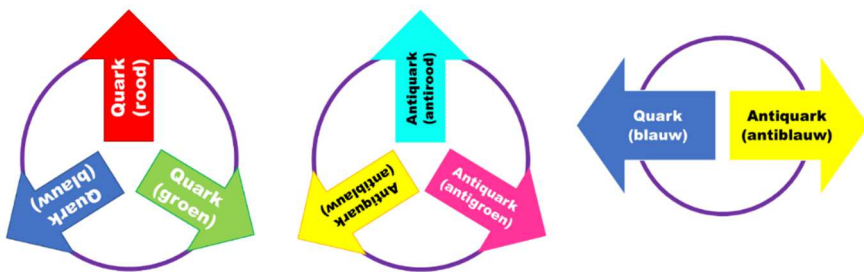
Figuur 155. Murray Gell-Mann

Murray Gell-Mann (15 september 1929, Manhattan New York, USA) begon zijn academische carrière reeds op zijn vijftiende als student aan de prestigieuze Yale-universiteit. Hij haalde zijn bachelorsdiploma in Natuurkunde in 1948 en promoveerde aan het MIT in 1951. In de jaren 1950 onderzocht hij verschillende deeltjes die waren aangetroffen in kosmische stralen. Hij stelde daarbij verschillende modellen voor die culmineerden in zijn quarkmodel uit 1964. Dit werk leverde hem de Nobelprijs voor Natuurkunde op in 1969.



Figuur 156. George Zweig

George Zweig (geboren op 30 mei 1937, in Moskou, Sovjetrepubliek Rusland) haalde zijn bachelorsdiploma wiskunde in 1959 aan de Universiteit van Michigan en trok vervolgens naar het California Institute of Technology om een doctoraat te maken in de theoretische fysica onder begeleiding van Richard Feynman. Hoewel de man een cruciale bijdrage leverde aan de natuurkunde, kreeg hij tot op heden geen Nobelprijs. In de jaren 1970 stapte hij over op de studie van het gehoor, meer bepaald van de wijze waarop akoestische impulsen in zenuwprikkels worden omgezet.



Figuur 157. Kleurenreacties tussen quarks

Van links naar rechts: samenstelling van een proton (uit drie quarks), van een antiproton (uit drie antiquarks) en van een meson (uit een quark en een antiquark) volgens de kwantumchromodynamica.

AUGUST 15, 1939

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 56

Forces in Molecules

R. P. FEYNMAN

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

(Received June 22, 1939)

Formulas have been developed to calculate the forces in a molecular system directly, rather than indirectly through the agency of energy. This permits an independent calculation of the slope of the curves of energy *vs.* position of the nuclei, and may thus increase the accuracy, or decrease the labor involved in the calculation of these curves. The force on a nucleus in an atomic system is shown to be just the classical electrostatic force that would be exerted on this nucleus by other nuclei and by the electrons' charge distribution. Qualitative implications of this are discussed.

Figuur 158. De start van Feynmans carrière



Figuur 159. Richard Feynman



Figuur 160. Hans Bethe en Emil Fuchs

Links: Hans Bethe (2 juli 1906, Straatsburg, Duitsland – 6 maart 2005, Ithaca, New York, VS) was niet enkel hoofd van de theoretische afdeling van het team in Los Alamos, maar was ook op vele andere vlakken actief. In 1967 won hij de Nobelprijs voor Natuurkunde voor zijn theorie over hoe zwaardere atoomkernen ontstaan in het hart van sterren.

Rechts: Emil Julius Klaus Fuchs (29 december 1911, Rüsselsheim, Duitse Keizerrijk – 28 januari 1988, Oost-Berlijn, Duitse Democratische Republiek)

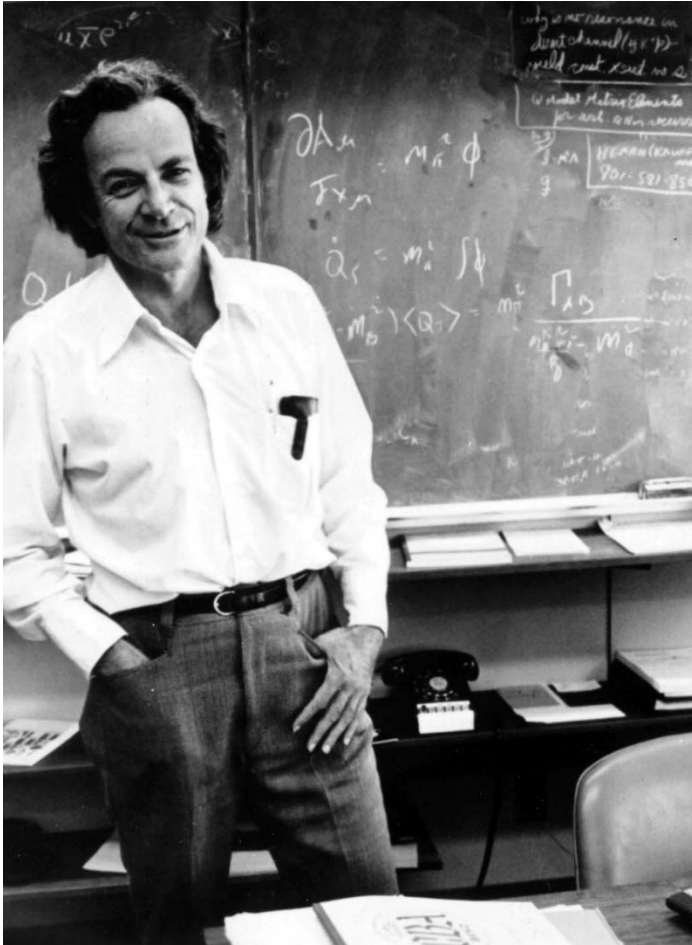


Figuur 161. Julian Schwinger en Shin'ichirō Tomonaga

Feynman ontving samen met Julian Schwinger (links) en Shin'ichirō Tomonaga (rechts) in 1965 de Nobelprijs in de Natuurkunde voor hun bijdragen aan de ontwikkeling van kwantumelektrodynamica.



Figuur 162. Ontploffing van het ruimteveer Challenger op 28/01/1986.



Figuur 163. Richard Feynman voor de klas op Caltech.



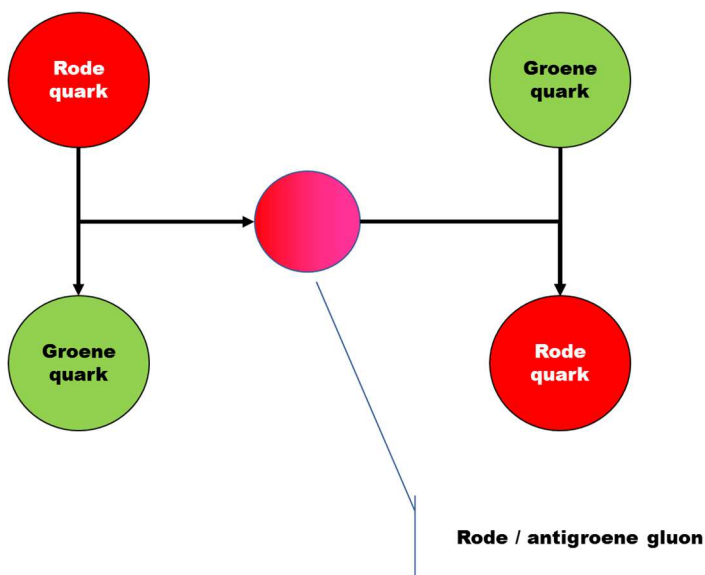
Figuur 164. Congres in Kopenhagen in 1937

Een congres in 1937 in Kopenhagen met heel wat Nobelprijswinnaars. Op de eerste rij onderscheiden we (van links naar rechts): Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Otto Stern, Lise Meitner, Rudolf Ladenburg en een onbenoemd gebleven collega. De middelste figuur, staand tegen de muur, is Léon Rosenfeld.

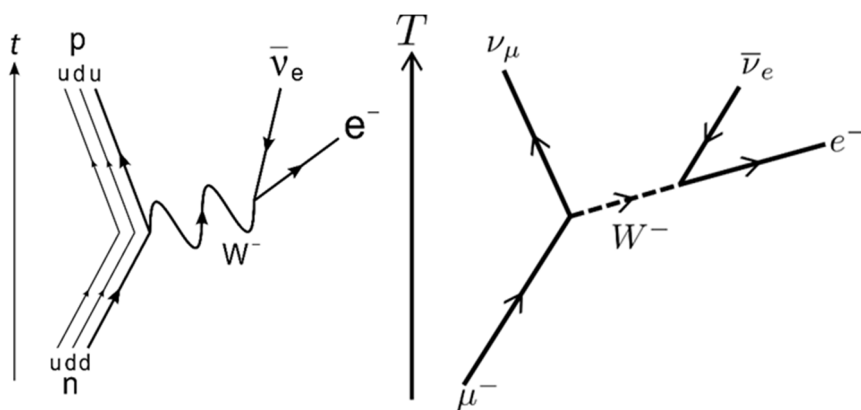
massa →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
lading →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t up	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 1.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ GeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1/2	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONEN	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$0.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	BOSONEN

Figuur 165. Standaardmodel van de Materie

Al deze deeltjes samen (quarks, leptonen en bosonen) vormen het Standaardmodel van de Materie.



Figuur 166. Een rood-antigroen gluon bindt een rode en een groene quark.



Figuur 167. Verval via W-bosonen

Links: Verklaring voor β -verval: een neutron verandert in een proton, door toedoen van een W^- -boson. Bij deze interactie komen een elektron en een elektron-antineutrino vrij, door verval van het boson.

Rechts: Ook muonen vervallen tot muon-neutrino's door een W^- -boson uit te sturen. Dit boson vervalt dan weer tot een elektron en een elektron-antineutrino.



Figuur 168. Simon Van der Meer en Carlo Rubbia

Links: Simon Van der Meer (24 november 1925, Den Haag, Nederland - 4 maart 2011, Genève, Zwitserland), hier samen met Koningin Beatrix op Huis ten Bosch (op 25 januari 1985). Van der Meer studeerde technische fysica aan de TU Delft en behaalde zijn ingenieursdiploma in 1952. Na enkele jaren te hebben gewerkt bij Philips Research in Eindhoven maakte hij in 1956 de overstap naar het CERN. Daar ontwikkelde hij koeltechnologie, nodig om antiprotonen te verzamelen en deze te stabiliseren (als deel van de Super Proton Synchrotron). Deze was van dermate groot belang bij de ontdekking van de W/Z-bosonen, dat hij er in 1984 samen met Carlo Rubbia de Nobelprijs voor Natuurkunde voor kreeg.

Rechts: Carlo Rubbia (geboren 31 maart 1934, Gorizia, Friuli-Venezia Giulia, Italië) behaalde zijn doctoraatsdiploma aan de Universiteit van Pisa in 1958. Daarna trok hij naar de Verenigde Staten om onderzoek te doen naar het verval van muonen (aan Columbia University). Aange trokken door de oprichting van het CERN keerde hij in 1960 terug naar Europa en zette aan dat instituut zijn onderzoek verder. Het was daar dat hij de W/Z-bosonen van de zwakke kernkracht ontdekte. In 1970 werd hij aangesteld als hoogleraar in Harvard, waar hij 18 jaar lang een semester per jaar doorbracht. In 1989 werd hij directeur-generaal van het CERN, tot 1993. Hij hield zich verder bezig met fundamentele vragen zoals de stabiliteit van het proton (waarvan de consensus is dat deze na een gemiddelde levensduur van 10^{32} jaar vervallen tot energie) en toegepaste vraagstukken (zoals nieuwe energietechnologieën (thoriumreactoren en methoden om zonne-energie te concentreren).



Figuur 169. Peter Higgs en François Englert

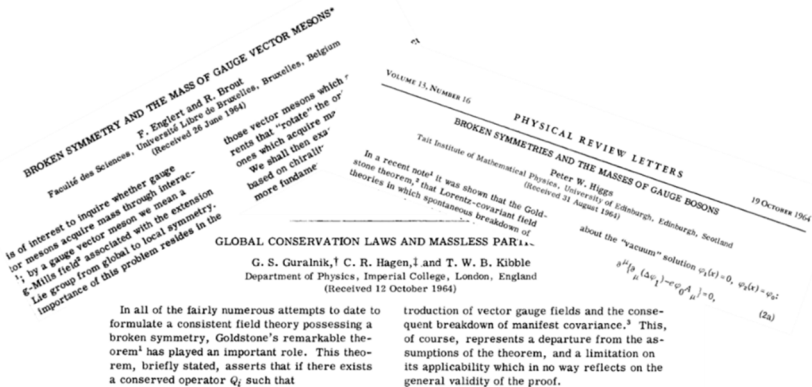
Peter Higgs (links, 29 mei 1929, Bristol, Groot-Brittannië) en François Englert (rechts, geboren op 6 november 1932, Etterbeek (Brussel), België), de Nobelprijswinnaars voor Natuurkunde in 2013. Die prijs kregen ze voor het uitwerken van een theoretisch kader dat kan verklaren waarom elementaire deeltjes een massa hebben (zoals beschreven in de tekst). In feite deden ze dat niet alleen: in 1964 verschenen immers kort na elkaar drie publicaties in Physical Review Letters die alle drie aan dit kader bijgedragen hebben. De eerste paper (in augustus 1964) was van de hand van François Englert en Robert Brout. De tweede (in oktober 1964) was geschreven door Peter Higgs. De derde kwam van Gerald Guralnik, Carl Hagen, en Tom Kibble, in november 1964.

Het was wel wachten tot experimenten in 2012 (op de Large Hadron Collider van het CERN) vooraleer het bestaan van het EBH-boson ook effectief werd aangetoond. Alleszins vormt dit Brout–Englert–Higgs–Guralnik–Hagen–Kibble deeltje (en het mechanisme waarop het werkt) een noodzakelijke basis van het Standaardmodel, en zet het de deur open naar een theorie waarbij alle basiskrachten tot één basiskracht worden verenigd. Goed voor een Nobelprijs dus.

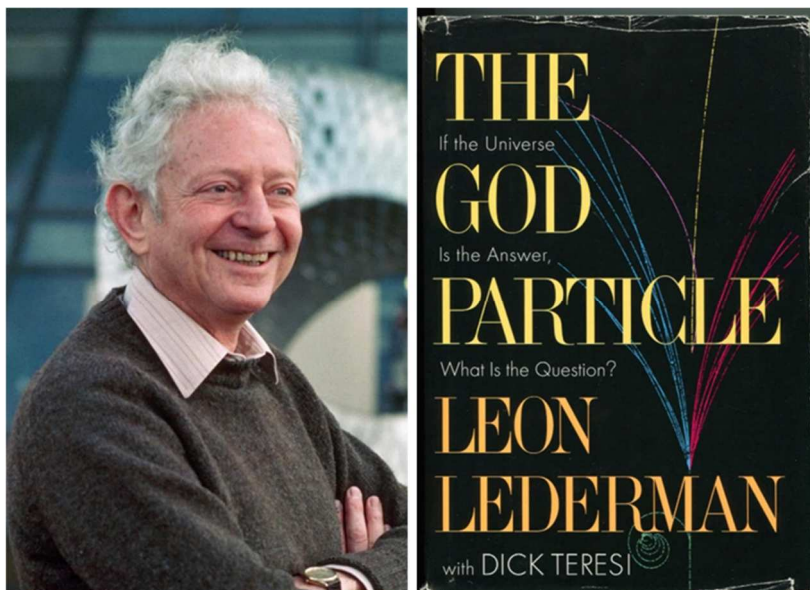


Figuur 170. Robert Brout

Robert Brout (14 juni 1928, New York, Verenigde Staten – 3 mei 2011, Linkebeek, België), de man die samen met Englert een van de drie cruciale papers schreef die het bestaan van het EBH-boson voorspelden. Doordat hij overleden was op het moment waarop de Nobelprijs werd toegekend, kon hij de prijs niet meer toegekend krijgen (ook niet postuum), omdat nu eenmaal in de reglementen staat dat enkel levende wetenschappers de prijs in ontvangst mogen nemen.

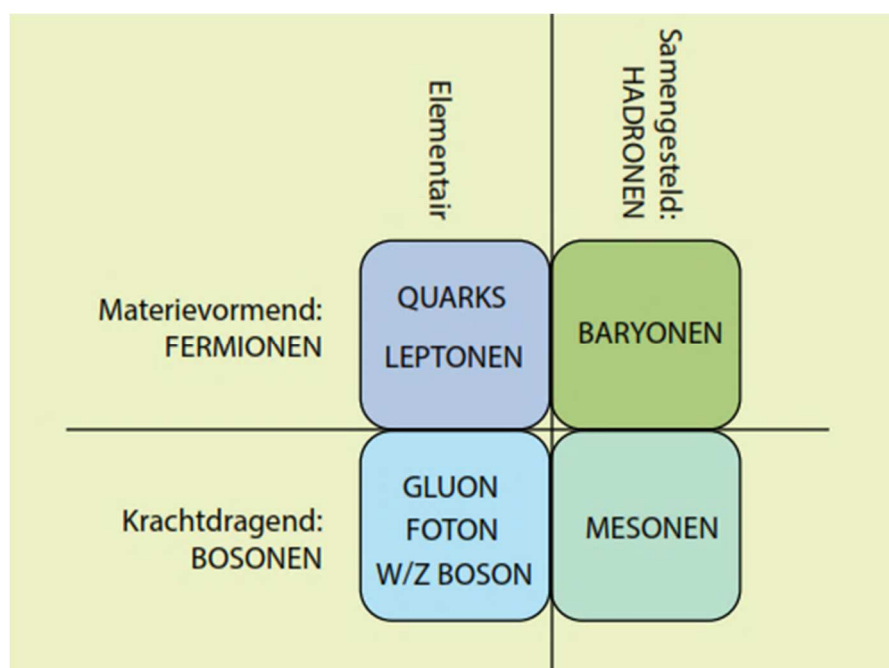


Figuur 171. De drie cruciale papers over het EBH-boson uit 1964.



Figuur 172. Leon Lederman en het godsdeeltje

T

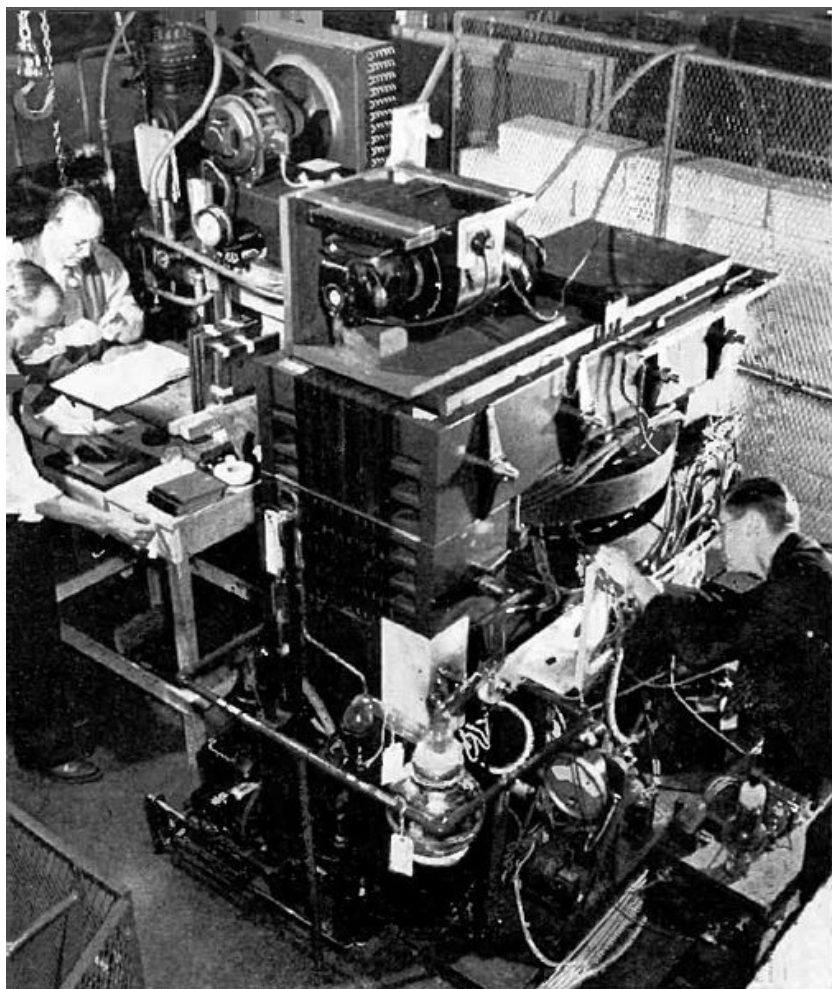


Figuur 173. Overzicht van de groepen elementaire en samengestelde deeltjes.



Figuur 174. Kaonvorming

Een foto uit 1957 van de vorming van een kaon door het Cosmotron in Brookhaven National Laboratory te New York. Het deeltje wordt afgeremd in de fotografische emulsie en vervalt tot een snel, positief geladen licht meson.



Figuur 175. Het bètatron van de University of Illinois

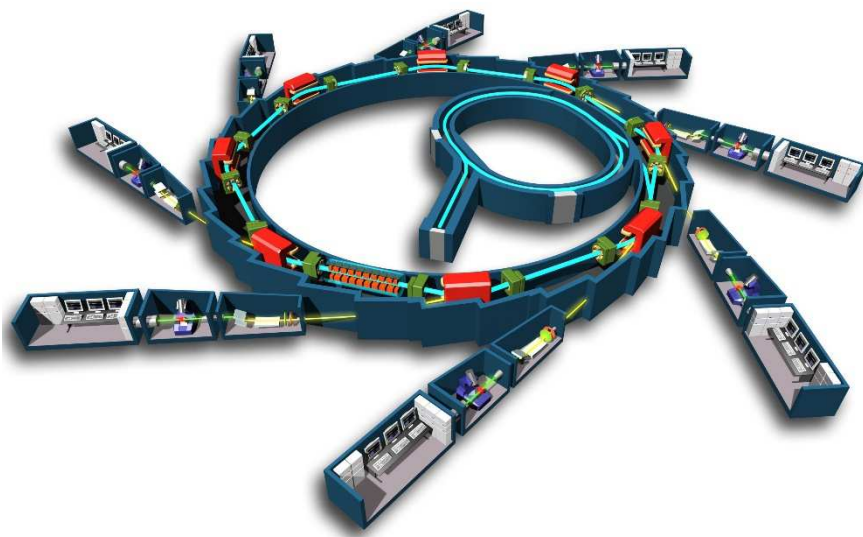
Het eerste bètatron, gebouwd door Donald Kerst (rechts in beeld) in 1940 aan de University of Illinois. De naam "bètatron" werd gekozen in een wedstrijd en verwijst naar het feit dat een straal versnelde elektronen niets anders is dan een bètastraal.

Andere voorstellen voor de naam waren rheotron, inductron, en zelfs Ausserordentlichhochgeschwindigkeitselektronenentwickelenden-schwerarbeitsbeigolllitron.



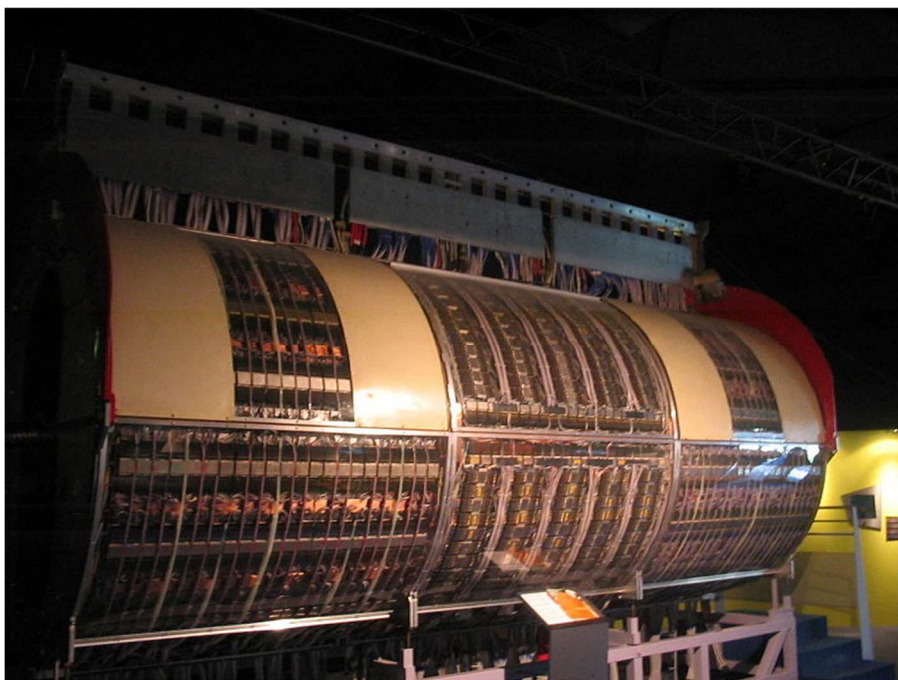
Figuur 177. Synchrotron Soleil

Het instituut voor het synchrotron “Soleil”, een synchrotron ten zuidwesten van Parijs. Dit synchrotron heeft een omtrek van 354 m en kan elektronen versnellen tot een energie van 2,75 GeV. Na slechts 1,2 microseconden heeft een elektron al bijna de snelheid van het licht bereikt. Deze bundel elektronen wordt op verschillende plaatsen afgeleid naar de eigenlijke experimenten.

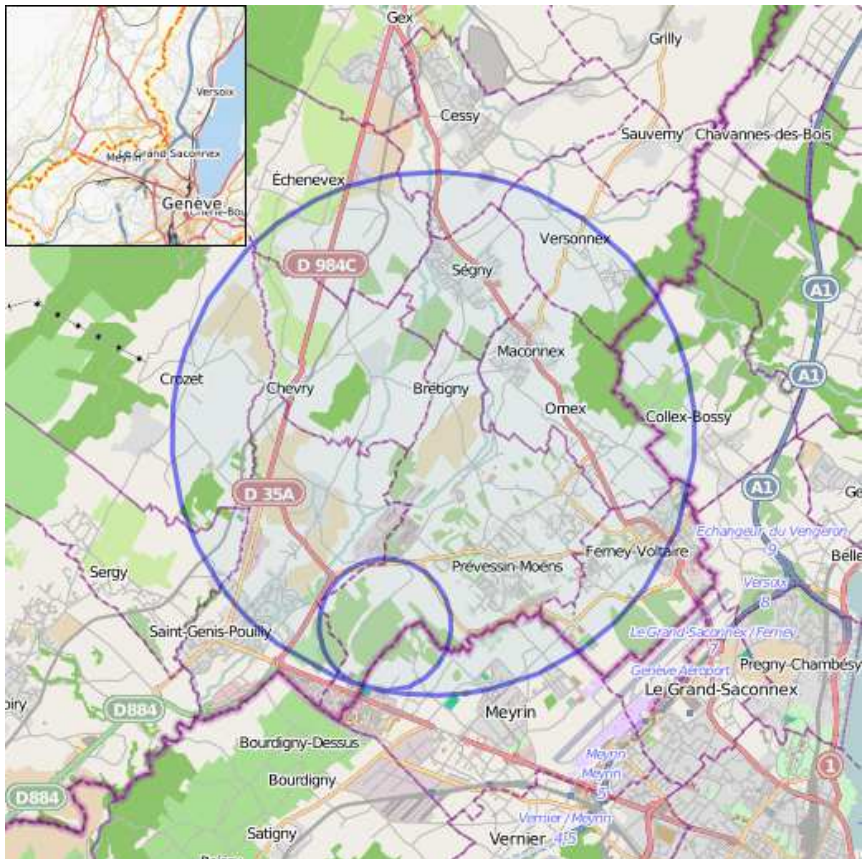


Figuur 178. Overzicht van Synchrotron Soleil.

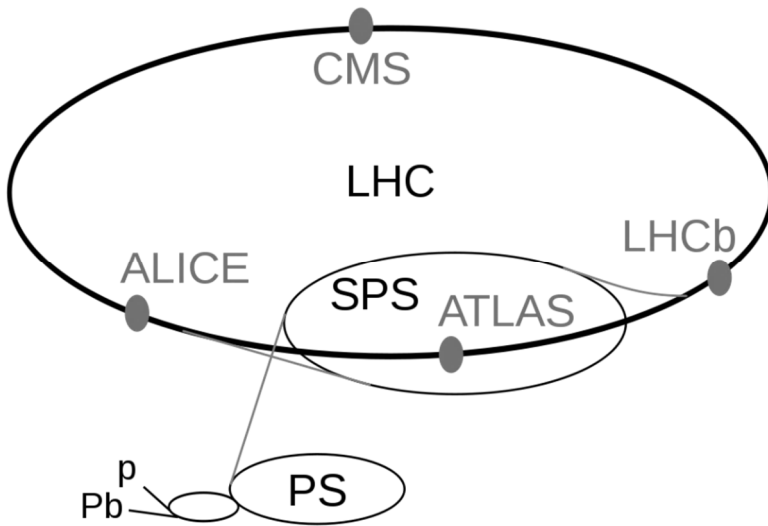
De buitenste cirkelvormige ring is de synchrotron. De elektronenbundel (lichtblauwe straal) wordt versneld door elektrische velden in de rechte secties tussen de groene vierkanten. De rode rechthoeken zijn magneten die de straal buigen. Op dat moment geven de elektronen synchrotronstraling (in geel) af. Die bestaat voornamelijk uit X-stralen. Ze worden afgeleid naar de verschillende straallijnen, waar wetenschappelijke instrumenten, experimenten enz... opgesteld staan.



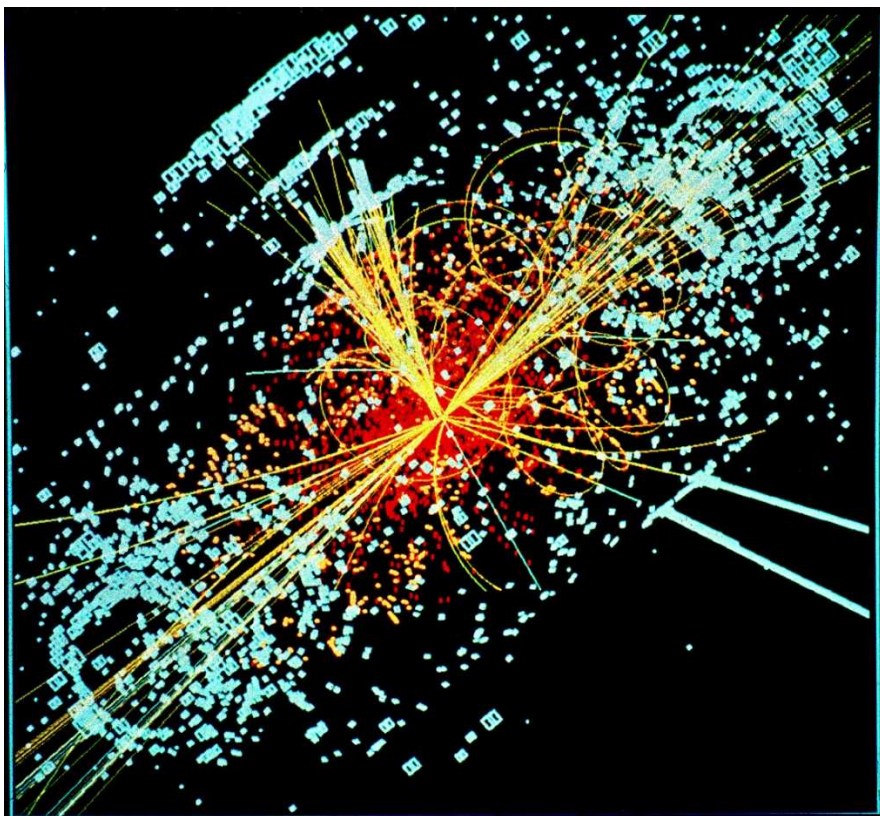
Figuur 179. Detector UA1 van de Super Proton Synchrotron op het CERN, waarmee de W- en Z-bosons werden ontdekt.



Figuur 180. De plaats van de Large Hadron Collider (grote cirkel) en de Super Proton Synchrotron (kleine cirkel) overheen de Frans-Zwitserse grens.

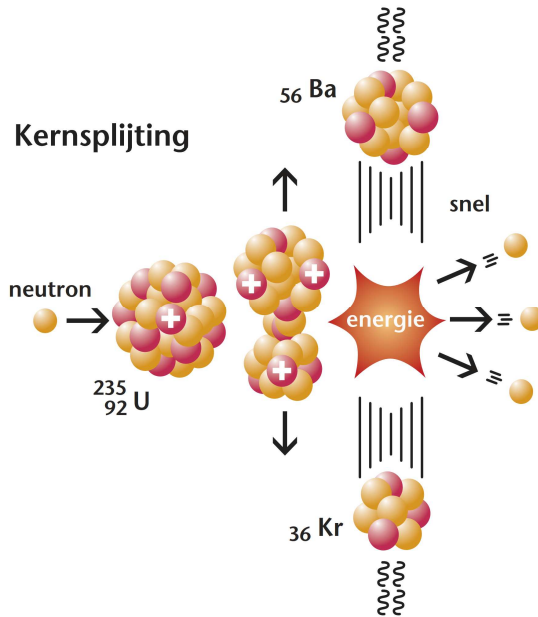


Figuur 181. Structuur van de LHC



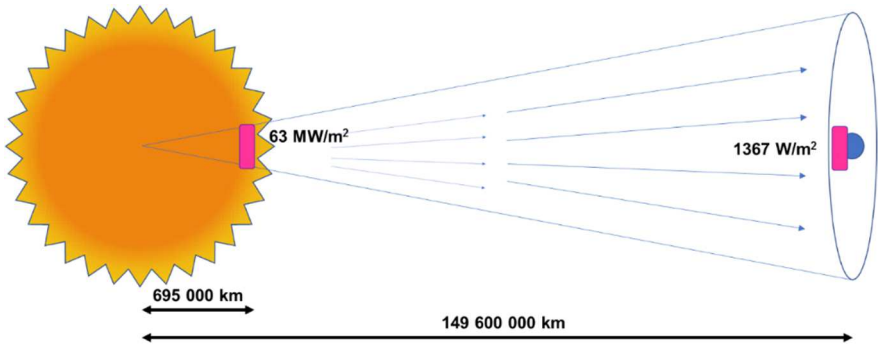
Figuur 182. Simulatie van de vorming van een EBH-boson na botsing van twee protonen.

Het EBH-boson vervalt vervolgens in een reeks hadronen en elektronen.

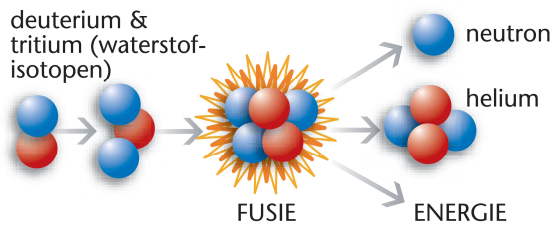
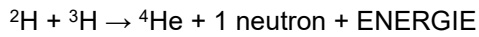


Figuur 183. Kernsplijting.

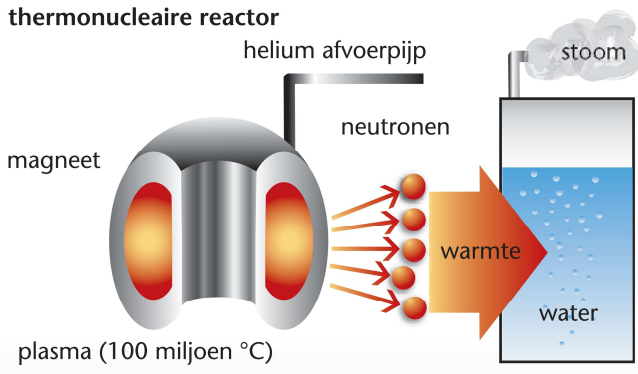
Door een bombardement met minder energierijke (en dus ‘tragere’) neutronen verandert de isotoop uranium-235 in het zeer kortlevende uranium-236, dat onmiddellijk uiteenvalt in twee kleinere atoomkernen, waarbij energie vrijkomt en bovendien nog meer neutronen. Ook deze neutronen kunnen een kettingreactie in gang zetten, en zo de splitsing veroorzaken van andere uraniumkernen. Deze eigenschappen maken uranium-235 cruciaal als splijtstof in kernreactoren: deze splijting is gemakkelijk op te wekken, produceert veel energie én houdt zichzelf in stand, en er is op aarde een substantiële hoeveelheid uranium-235 te vinden.



Figuur 184. Slechts een fractie van de energie die de zon uitstraalt, bereikt de aarde.

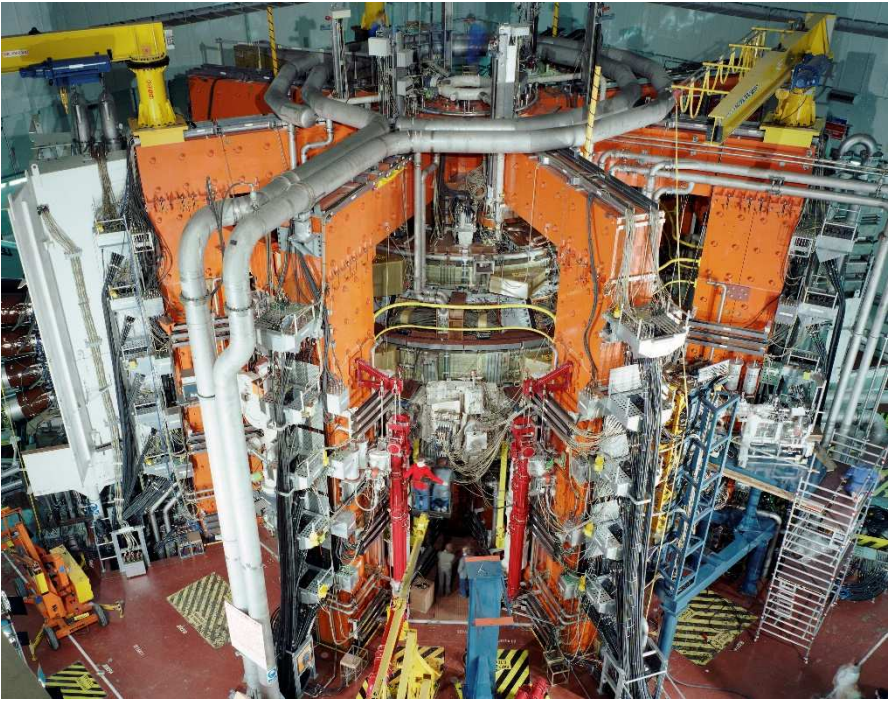


Figuur 185. Kernfusiereactie



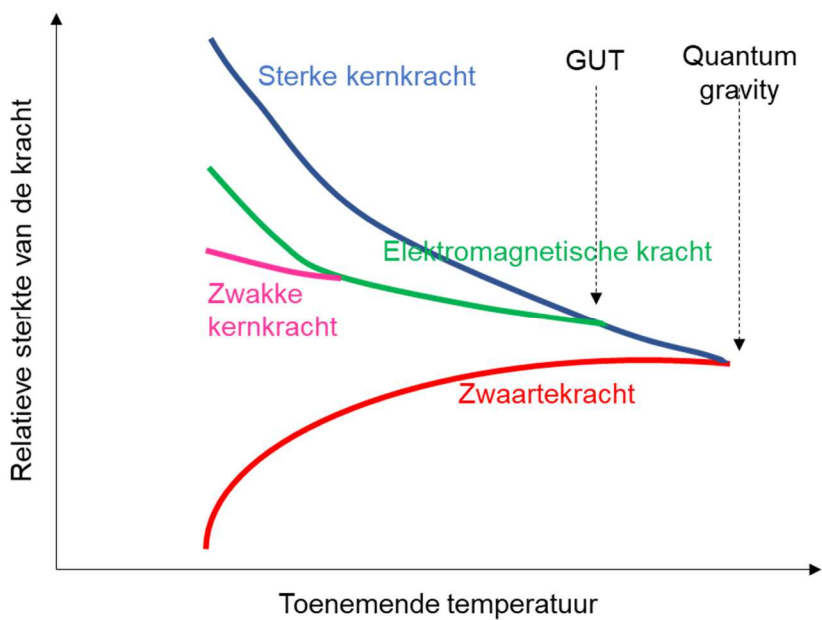
Figuur 186. Werking van een fusiereactor

Het concept van een tokamak werd in 1952 ontwikkeld door Andrei Sacharov en Igor Tamm aan het Kurtschatovinstituut in Moskou. De eerste tokamak was dan ook van Russische makelij en dateert van 1962. Het woord zelf is een acroniem gebaseerd op de Russische woorden toroidalnaja (torusvormig), kamera (ruimte), magnitnaja (magnetisch) en katoesjkan (spoel). Voor details, zie de tekst.



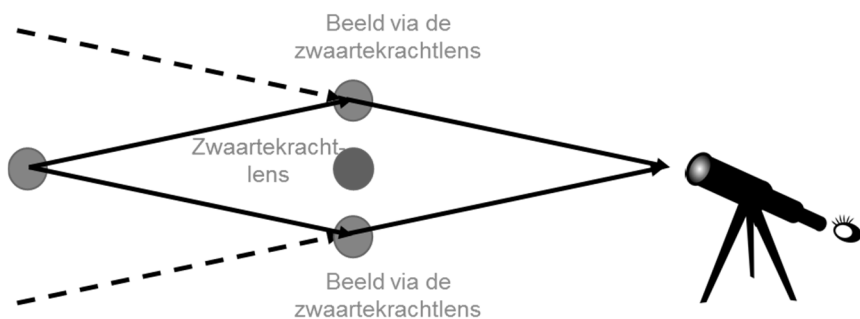
Figuur 187. De Joint European Torus, een experimentele kernfusiereactor.

Het hart van deze machine is een tokamak van 6 meter en 2,4 meter hoog, omhuld door talrijke verwarmings-, koel- en meetsystemen. De grote oranje structuren bestaan uit ijzer en focussen het magnetische veld dat de hete gassen in het vat beheert, bij temperaturen tot 200 miljoen graden. De hoge witte toren op de voorgrond rechts herbergt de acht neutrale straalverwarmers, die 100.000 volt gebruiken om gas in het vat te schieten. Op de kleinere witte cilinder rechts zijn een aantal spiegels die dienen om lasers op het hete gas te richten, en dan de temperatuur en de dichtheid ervan te meten met behulp van Thompsonscattering. De witte kast links is een apparaat om de energie van neutronen te meten - het essentiële product van fusie. De gesegmenteerde witte toren uiterst links is de Pellet Injection Box, die het experiment aan de gang houdt met kleine, diepgevroren (-260°C) brandstofblokjes. Ernaast zit een wit kader met een reeks zwarte buizen erop die via microgolven warmte op het plasma afsturen. Bovenop de structuur zitten grote waterkoelleidingen en vier gele kranen voor het verplaatsen van onderdelen tijdens onderhoud.

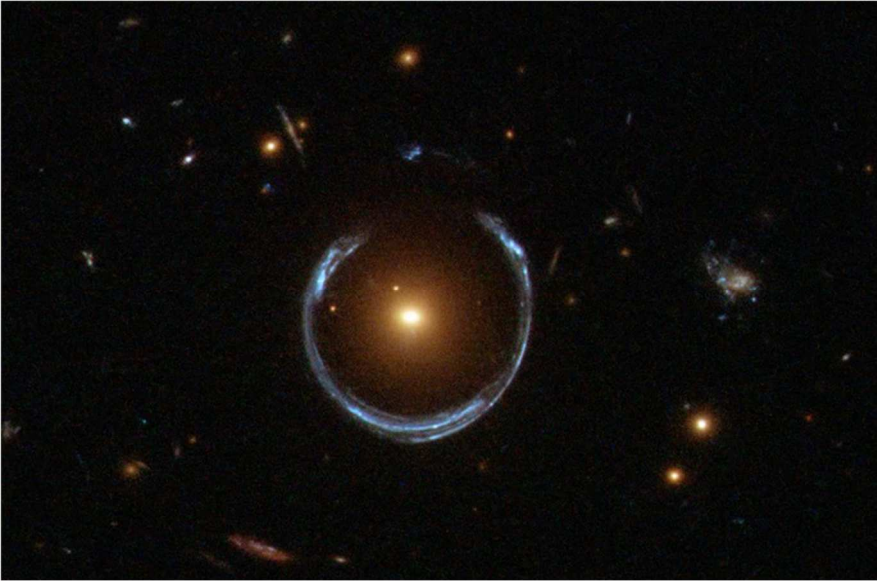


Figuur 188. Vereniging van de vier fundamentele krachten

Gebeurtenis	Tijd sinds begin universum	Temperatuur (in GeV) *
Alle krachten verenigd	~ 0	\sim oneindig
Zwaartekracht splitst af van de algemene geünificeerde kracht (GUT)	10^{-43} s	10^{19}
Sterke kernkracht splitst af van de elektrozwakke kracht	10^{-35} s	10^{14}
Zwakke kernkracht en elektromagnetische kracht splitsen af	10^{-11} s	100
Huidig universum	10^{10} jaren	10^{-12}



Figuur 189. Werking van een gravitatielens



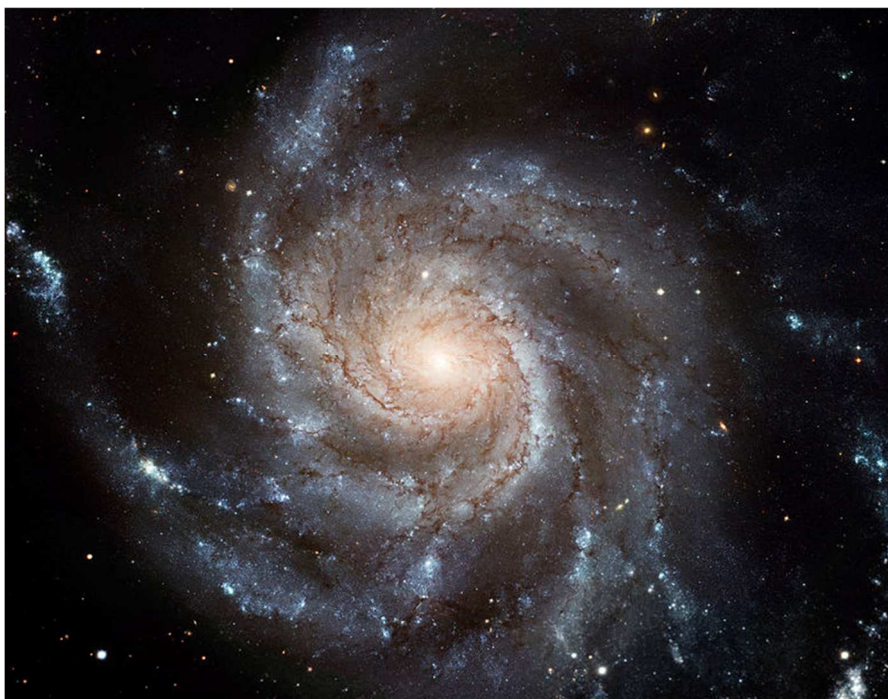
Figuur 190. Effect van een zwaartekracht lens

Deze foto toont hoe de zwaartekracht van een heldere rode melkweg het licht van een achterliggende blauwe melkweg zodanig ombuigt, dat het blauwe licht bijna een volle cirkel (een hoefijzer) rondom de zwaartekracht lens vormt. Vermits Einstein dergelijke beelden meer dan 70 jaar geleden al voorspeld heeft, noemt men zo een hoefijzer ook wel een Einsteinring.



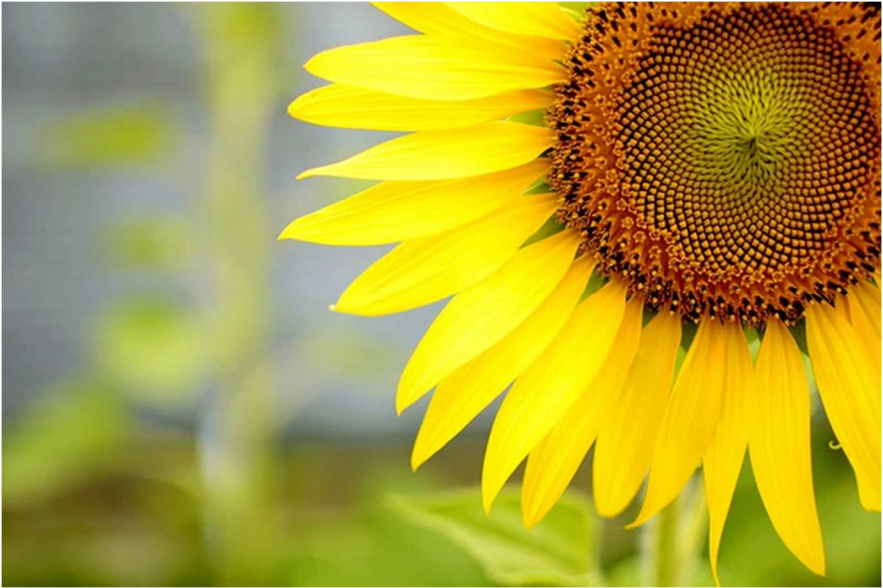
Figuur 191, Vera Rubin

Vera Cooper Rubin (23 juli 1928, Philadelphia, Pennsylvania, USA – 25 december 2016, Princeton, New Jersey, USA) was een Amerikaanse astronome die in de jaren 1970 vaststelde dat er een discrepantie bestond tussen de snelheid waarmee spiraalvormige melkwegen ronddraaiden en de veronderstelde massa aan gassen en sterrenstelsels. Enkel door de aanwezigheid van donkere materie kan die snelheid correct worden voorspeld. Op de foto zien we Anne Kinney (NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md) Vera Rubin (Dept. of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institute of Washington), Nancy Grace Roman (Retired, NASA Goddard) Kerri Cahoy, (NASA Ames Research Center, Moffett Field, Californië) en Randi Ludwig. (University of Texas, Austin, Texas). Deze foto werd genomen op de NASA Sponsors Women in Astronomy and Space Science 2009 Conference, gehouden aan de University of Maryland tussen 21 en 23 oktober 2009.

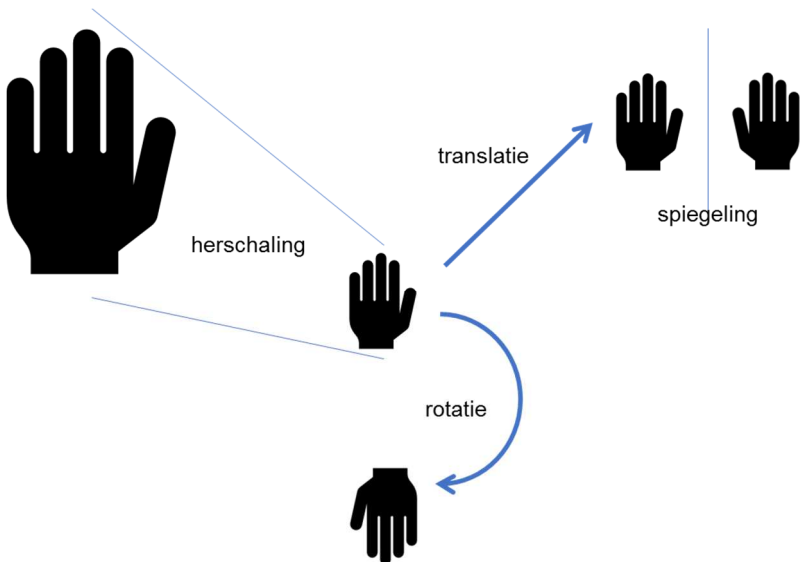


Figuur 192. Messier 101

Melkwegstelsel Messier 101 (M101, ook bekend als NGC 5457, of met zijn bijnaam "Pinwheel Galaxy") is een voorbeeld van een spiraalvormige melkweg.



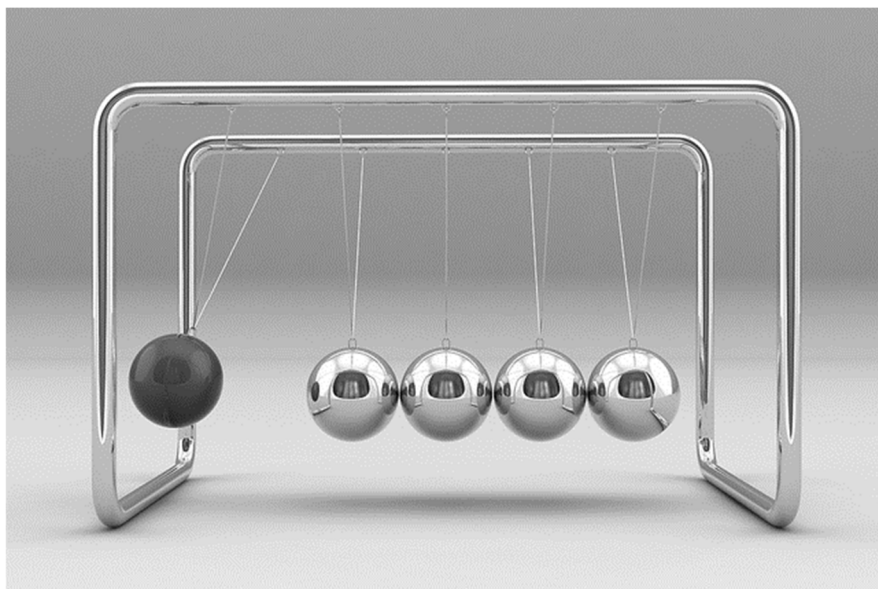
Figuur 193. Meetkundige symmetrie in het hart van de zonnebloem



Figuur 194. Verschillende vormen van symmetrie.



Figuur 195. Duidelijk een geval van gebroken pariteitssymmetrie.



Figuur 196. Een Newtonpendel.

Zeg het maar zelf – hoe beweegt die bal aan de linkerkant, naar links of naar rechts?

Bosonen en hun superpartners

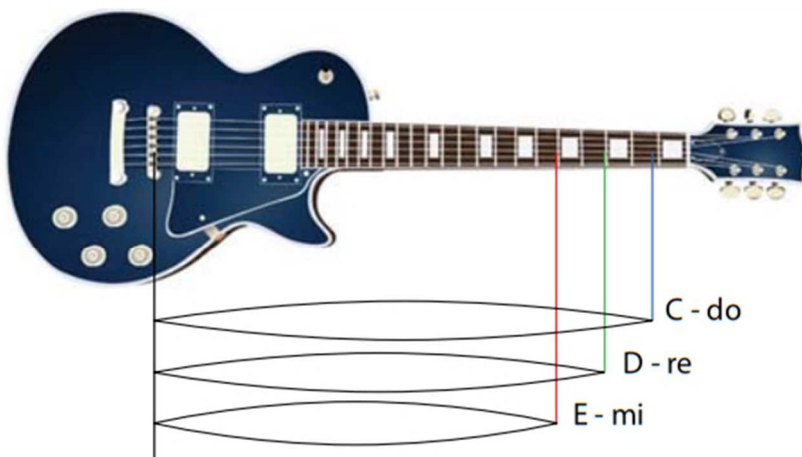
<i>Naam</i>	<i>Spin</i>	<i>Superpartner</i>	<i>Spin</i>
Graviton	2	Gravitino	3/2
Foton	1	Fotino	1/2
Gluon	1	Gluino	1/2
$W^{+/-}$	1	Wino $^{+/-}$	1/2
Z^0	1	Zino	1/2
Higgs	0	Higgsino	1/2

Fermionen en hun superpartners

<i>Naam</i>	<i>Spin</i>	<i>Superpartner</i>	<i>Spin</i>
Elektron	1/2	Selectron	0
Muon	1/2	Smuon	0
Tau	1/2	Stau	0
Neutrino	1/2	Sneutrino	0
Quark	1/2	Squark	0



Figuur 197. Een replica van de eenheid van massa, de kilogram, bewaard in Parijs, Frankrijk.



Figuur 198. De snarenanalogie.

Net zoals een snaar op een instrument verschillende noten kan voortbrengen, brengt een string meerdere deeltjes voor, afhankelijk van de manier waarop hij trilt.



Figuur 199. De grondleggers van de snarentheorie.

Bovenaan links: Gabriele Veneziano (7 september 1942, Firenze, Italië) lag aan de basis van het ontstaan van de snarentheorie. In 1991 werkte hij een theorie uit die de link legde tussen snarentheorie en het bestaan van een uitdijend heelal, vertrokken vanuit een Big Bang. Hieruit kon hij scenario's afleiden voor wat er zich voor die Big Bang zou kunnen hebben afgespeeld.

Bovenaan rechts: Holger Bech Nielsen (25 augustus 1941, Kopenhagen, Denemarken). De man heeft niet enkel een indrukwekkende carrière als onderzoeker, maar staat in Denemarken ook bekend voor zijn enthousiaste publieke lezingen over snarentheorie. In 2009 werkte hij samen met zijn collega Masao Ninomiya een radicale theorie voor om de schijnbare onwaarschijnlijke reeks problemen te verklaren waarmee de Large Hadron Collider mee bleef kampen bij de zoektocht naar het Englert-Brout-Higgsboson. Nielsen en Ninomaya suggereerden in hun publicaties dat dit deeltje voor de natuur dermate weerzinwendig zou zijn dat de schepping ervan achterwaartse golven in de tijd zou opwekken, die het ontstaan van het deeltje zelf zouden tegenhouden en de collider zou stoppen voordat het toestel er een kon creëren.

Onderaan links: Leonard Susskind (1940, Bronx, New York City, USA) tijdens een college aan Stanford University.

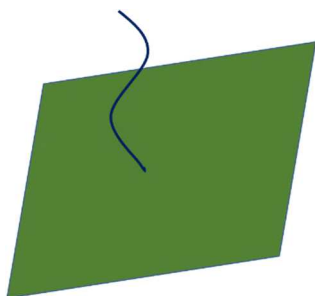
Naast zijn eminente wetenschappelijke carrière investeert Susskind nog behoorlijk wat tijd in het toegankelijker maken van de natuurkunde voor het brede publiek. Zijn boek Classical Mechanics: The Theoretical Minimum, was een bestseller in de Verenigde Staten. Daarnaast heeft hij een lessenreeks rond natuurkunde op Youtube. Hij houdt zicht wel aan een gezond principe: "Don't let our light-hearted humour fool you into thinking that we're writing for airheads. We're not. Our goal is to make a difficult subject 'as simple as possible, but no simpler'."

Onderaan rechts: Yoichiro Nambu (18 januari 1921, Tokyo, Japan – 5 juli 2015, Osaka, Japan) is van deze vier de enige die reeds een Nobelprijs mocht ontvangen (in 2002), maar niet voor zijn bijdrage aan snarentheorie, maar voor zijn wiskundig werk dat verklaart hoe de symmetrie van natuurkundige wetten kan geschonden worden.

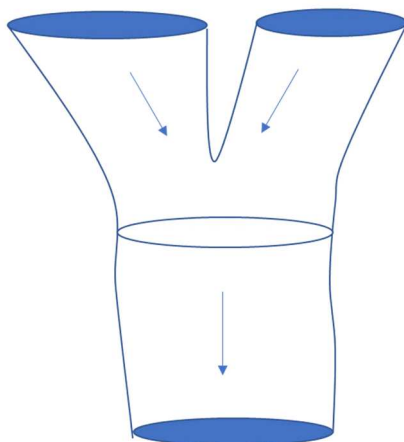
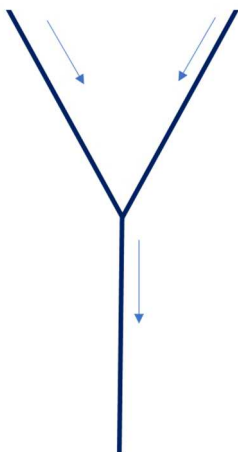
Open snaren (links in onderstaande schets) hebben twee duidelijke eindpunten, terwijl gesloten snaren (rechts) gesloten krommen beschrijven.

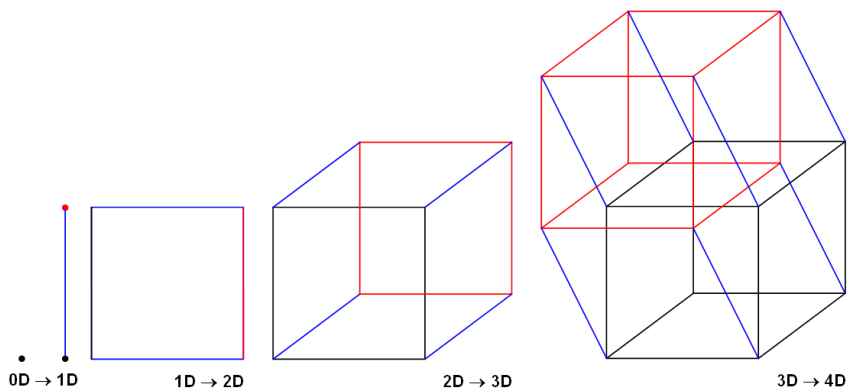


Een snaar beweegt zich voort op het oppervlak van een wereldvlak



Snaren interageren met mekaar door zich met mekaar te verbinden of door weer uit mekaar te gaan.



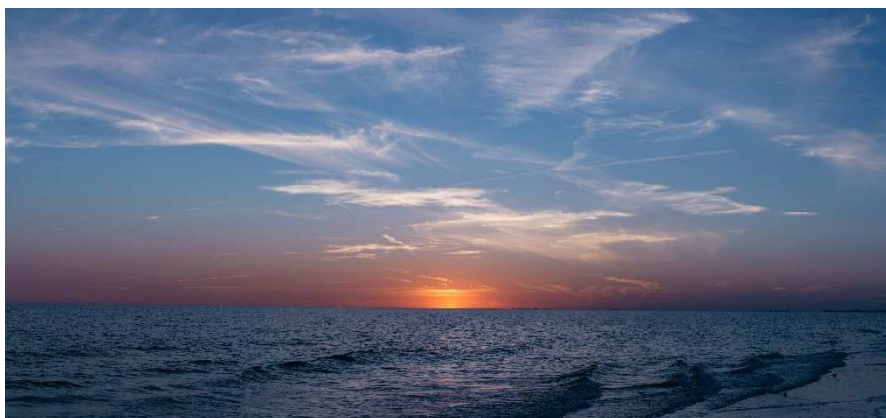


Figuur 200. Van nul naar vier dimensies.

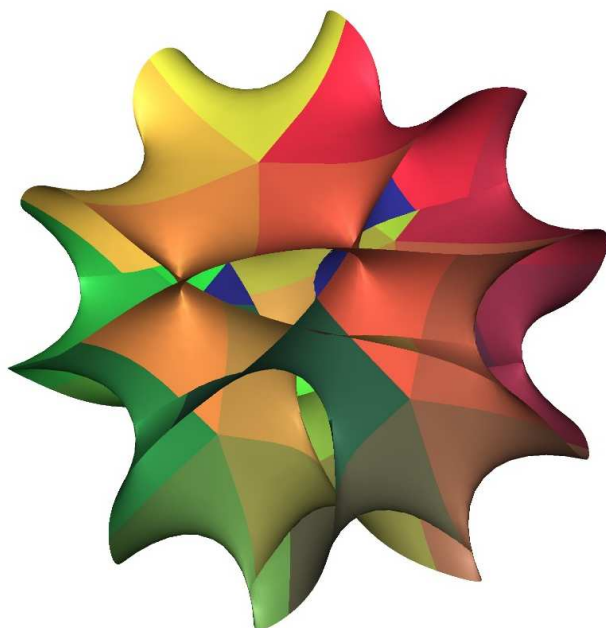
Hogere dimensies zijn nogal moeilijk over te brengen op een plat vlak... zoals een bladzijde in een boek of een computerscherm. Desalniettemin kunnen we die vier dimensies best begrijpen: het gaat dan over de drie ruimtelijke dimensies en één die het verloop van de tijd voorstelt.



Figuur 201. Een torus. Of een donut, dus.



Figuur 202. De onbereikbare einder bewijst dat de aarde onbegrensd is (in twee dimensies).



Figuur 203. 2D-projectie van een Calabi-Yau-manifold

Een projectie van zes dimensies op een tweedimensionaal vlak (deze pagina) is uiteraard slechts in staat om een fractie van de complexiteit weer te geven. en voor een extra visualisatie is er deze video:

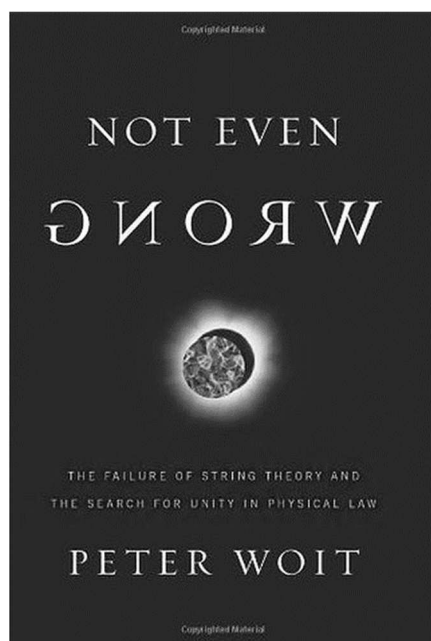
<https://www.youtube.com/watch?v=b0wpV50Num4>



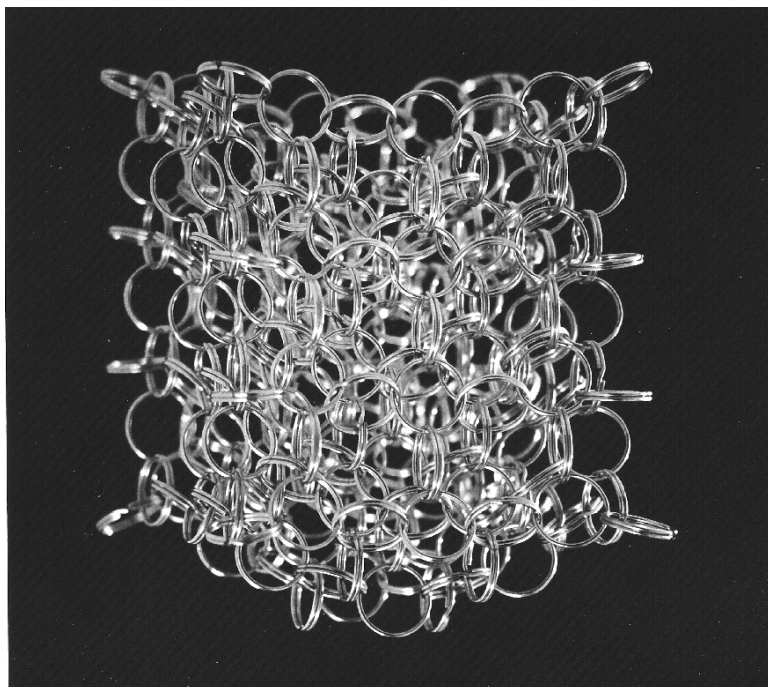
Figuur 204. Eugenio Calabi en Shing-Tung Yau

Links: Eugenio Calabi (11 mei 1923, Milaan, Italië), professor emeritus aan de Universiteit van Pennsylvania.

Rechts: Shing-Tung Yau (4 april, 1949, Shantou, Provincie Guangdong, China), de man die de Stelling van Calabi bewees en daarmee de wiskundige basis onder de snarentheorie sterker maakte. Hij bekleedt op dit moment de positie van William Caspar Graustein Professor of Mathematics aan Harvard.



Figuur 205. Het boek van Peter Woit over de snarentheorie



Figuur 206. Artistieke impressie van een spinnetwerk



Figuur 207. Carlo Rovelli en Lee Smolin

Twee grondleggers van de luskwantumzwaartekrachttheorie, Carlo Rovelli (links, 3 mei 1956, Verona, Italië) en Lee Smolin (rechts, 6 juni 1955, New York, VS).



Figuur 208. Achilles

Even filosofisch – luskwantumzwaartekracht lost zo de paradox van de Griekse wijsgeer Zeno over Achilles en de schildpad op. Hierin gaat de snelle Achilles een loopwedstrijd aan met een schildpad, en geeft de held het arme reptiel zelfs een voorsprong: de schildpad mag al halverwege het parcours starten. Maar bij Zeus – zodra Achilles die plaats bereikt heeft, is de schildpad alweer een heel eind verder, op een tweede punt. En wanneer Achilles dat tweede punt heeft bereikt, is de schildpad alweer een stuk vooruit. Uiteindelijk kan Achilles volgens Zeno de schildpad nooit volledig inhalen. Toch wel, zegt de moderne fysica, want uiteindelijk moeten ze samen dezelfde stap zetten – die van het ene pakketje ruimtetijd dat ze willen overbruggen.

Bijlage 2 – Overzicht van de ontdekkingen

600 v.Chr.	Thales van Milete	Water als oerelement
420 v.Chr.	Democritus, Leucippus	Eerste atoomtheorie
400 v.Chr.	Empedocles	Vier oerelementen
99-55 v.Chr.	Lucretius	De Rerum Natura
1661	Robert Boyle	<i>The Skeptical Chymist</i> : geboorte van de moderne scheikunde
1789	Antoine de Lavoisier	<i>Traité Élémentaire de Chimie</i> ; nieuwe definitie van element/atoomsoort
1802	Thomas Young	Tweespletenexperiment met licht
1808	John Dalton	<i>A New System of Chemical philosophy</i> : geboorte van de moderne atoomtheorie
1887	Joseph John Thomson	Ontdekking van het elektron
1895	Pierre en Marie Curie	Huwelijk
1896	Henri Becquerel	Radioactiviteit
1900	Wilhelm Ostwald	Begrip “mol”
1900	Max Planck	Begrip “kwantum”
1900	Joseph John Thomson	Atoommodel van Thomson
1901	Ernest Rutherford Frederick Soddy	Radioactief verval
1902	Gilbert Lewis	Atoommodel van Lewis
1903	Pierre en Marie Curie	Radium en polonium
1905	Albert Einstein	Speciale relativiteitstheorie Fotoelektrisch effect $E=mc^2$

1908	Ernest Rutherford	Alfadeeltjes zijn heliumkernen
1909	Jean Baptiste Perrin	Getal van Avogadro
1909-1910	Robert Millikan	Lading van het elektron
1911	Ernest Solvay	Eerste Solvayconferentie in Brussel
1911	Ernest Rutherford Hans Geiger Ernest Marsden	De atoomkern Atoommodel van Rutherford
1913	Niels Bohr Ernest Rutherford	Atoommodel van Bohr (en Rutherford)
1919	Niels Bohr Arnold Sommerfeld	Atoommodel van Bohr en Sommerfeld
1920	Ernest Rutherford	Ontdekking van het proton
1925	Erwin Schrödinger	Golfvergelijking
1925	Werner Heisenberg	Onzekerheidsprincipe
1925	Wolfgang Pauli	Exclusieprincipe
1927	Ernest Solvay	Solvay Conference on Quantum Mechanics
1928	Rolf Widerøe	Eerste deeltjesversneller
1931	Wolfgang Pauli	Ontdekking van het neutrino
1932	John Cockcroft Ernest Walton	Deeltjesversneller
1932	James Chadwick	Ontdekking van het neutron
1932	Carl Anderson Patrick Blackett Guiseppe Occhialini	Antimaterie: ontdekking van het positron
1933	Kenneth Bainbridge	Experimenteel bewijs (met massaspectrometer) voor $E = mc^2$
1935	Erwin Schrödinger	Gedachtenexperiment met een kat
1935	Hideki Yukawa	Ontdekking van het pion
1937	Ernest Rutherford	Transmutatie van elementen

	Patrick Blackett	
1938	Ernest Lawrence	Cyclotron
1959	Richard Feynman	There's Plenty of Room at the Bottom (boek)
1964	Murray Gell-Mann Georg Zweig	Quarkmodel
1964	François Englert Robert Brout Peter Higgs Gerald Guralnik Carl Hagen Tom Kibble	Theoretische voorspelling van het EBH-boson
1968		Ontdekking van up/down quarks. Bewijs voor strange-quark
1969-1970	Yoichiro Nambu Holger Bech Nielsen Leonard Susskind	Ontwikkeling van de snarentheorie
1970	Richard Feynman	Ontwikkeling van de kwantumchromodynamica
1974		Ontdekking van de charm-quark
1977		Ontdekking van de bottom-quark
1983	Simon van der Meer Carlo Rubbia	Ontdekking van W/Z-bosonen
1989	Akira Tonomura	Tweespletenexperiment met (individuele) elektronen
1995		Ontdekking van de top-quark
2008	CERN	Bouw van de Large Hadron Collider
2012	CERN	Ontdekking van het EHB-boson op de Large Hadron Collider

2013	Sandra Eibenberger	Tweespletenexperiment met grote moleculen
------	--------------------	---

Lijst met bronnen van figuren

Kaft	X-ray, Optische & Infrarode Composietfoto van Kepler's Supernova Remnant; NASA/ESA/JHU/R.Sankrit & W.Blair. Publiek domein.
Figuur 1	CERN, http://scitechlab.wordpress.com/2007/12/05/the-large-hadron-collideratlas-at-cern/ , CC BY 2.0
Figuur 2	<i>Illustrerad verldshistoria, volume I</i> , uitgegeven door E. Wallis (1875). Publiek domein.
Figuur 3	Thomas Stanley, <i>The history of philosophy</i> , 1655. Publiek domein.
Figuur 4	Schilderij door Antoine Coype (1661-1722), in het Louvre. Publiek domein.
Figuur 5	Lucretius, "De Rerum Natura", uitgegeven door Tanaquil Faber in 1675. Publiek domein.
Figuur 6	Portrait of The Honourable Robert Boyle (1627 - 1691), Irish natural philosopher, Wellcome Images, CC BY 4.0, http://wellcomeimages.org/indexplus/obf_images/69/9b/ce76a6c3ca53526d9c0ebe1c01ca.jpg
Figuur 7	Antoine Lavoisier, <i>Traité Élémentaire de Chimie</i> , uit 1789. Publiek domein
Figuur 8	Antoine Lavoisier, <i>Traité Élémentaire de Chimie</i> , uit 1789. Publiek domein.
Figuur 9	Schilderij door L. David, uit 1788, te vinden in het Metropolitan Museum of Art. Publiek domein.
Figuur 10	Publiek domein.
Figuur 11	Publiek domein.
Figuur 12	Marek Novotňák, Wikimedia, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Azurite,_malachite.jpg
Figuur 13	<i>John Dalton and the Rise of Modern Chemistry</i> door Henry Roscoe (auteur), William Henry Worthington (figuur), en Joseph Allen (schilder). Publiek domein
Figuur 14	Eigen werk.
Figuur 15	John Dalton, <i>A New System of Chemical Philosophy</i> , uit 1808. Publiek domein.

Figuur 16	Eigen werk.
Figuur 17	Friedrich Mohr, <i>Lehrbuch der chemisch-analytischen Titrimethode</i> , uit 1877. Publiek domein.
Figuur 18	Publiek domein.
Figuur 19	Publiek domein.
Figuur 20	MeNS 65, http://www.biomens.eu/?p=mens&nr=65 .
Figuur 21	Tekening door C. Sentier, uit 1856. Publiek domein.
Figuur 22	Steven G. Johnson, Wikipedia, CC BY-SA 3.0, zie ook https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_huckleberry-Acadia.jpg .
Figuur 23	Links: Wdvorak, Wikipedia, CC BY-SA 3.0, zie ook https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Haus_Malfatti_Gedenktafel_Loschmidt.jpg . Rechts: Publiek domein.
Figuur 24	Links: Popular Science Monthly, Volume 67, 1905. Publiek domein. Rechts: Bibliothèque nationale de France, 1926. Publiek domein.
Figuur 25	Becker P. (2001) <i>History and progress in the accurate determination of the Avogadro constant</i> , Rep. Prog. Phys. 4, 1945-2008.
Figuur 26	Links: William Gilbert, Olieverf op hout, Wellcome library. Publiek domein. Midden: Otto von Guericke, Wellcome library CC BY-SA 4.0 http://catalogue.wellcomelibrary.org/record=b1167069 Rechts : Charles François de Cisternay du Fay Publiek domein.
Figuur 27	Links: Benjamin Franklin (1868), Library of Congress, Publiek domein. Rechts: Benjamin Franklin Drawing Electricity from the Sky. Schilderij door Benjamin West. rond 1816, in het Philadelphia Museum of Art,. Publiek domein.
Figuur 28	Popular Science Monthly Volume 73, Publiek domein.
Figuur 29	J.J. Thomson, Philosophical Magazine, 44, 293 (1897). Publiek domein.
Figuur 30	Links: Lachlan Hardy, Flickr, CC BY 2.0, https://www.flickr.com/photos/lachlanhardy/4231586321
Figuur 31	Beide foto's publiek domein.
Figuur 32	Eigen werk
Figuur 33	Links: Fluorescerende koralen (Underwater Observatory Marine Park, Eilat). Bron: Tiia Monto, CC BY-SA 3.0. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluorescent_coral.jpg Rechts: Fosforescente wijzerplaat. Bron: Naklig. CC BY-SA 3.0 Greece, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Citizen-200m-Diver's.jpg
Figuur 34	Publiek domein.
Figuur 35	Publiek domein.
Figuur 36	Links: Paul Nadar, Collection: Scientific Identity: Portraits from the Dibner Library of the History of Science and Technology, Smithsonian Institution Libraries. http://photography.si.edu/SearchImage.aspx?t=5&id=3477&q=SIL14-B2-08 . Publiek domein. midden: Paul Nadar - Bibliothèque nationale de France. http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b53100803v.r=.langEN Publiek domein.

	rechts: http://www.photo.rmn.fr/C.aspx?VP3=SearchResult&IID=2C6NU0VQ8YWLW , publiek domein
Figuur 37	Eigen werk.
Figuur 38	Vitold Muratov, scan uit Welt im Umbruch 1900-1914". Verlag Das Beste GmbH.Stuttgart. 1999 ISBN 3870708379, CC BY-SA 3.0
	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Marie_et_Pierre_Curie.jpg
Figuur 39	Bron: Quartz Piezo Electrometer, Mütter Museum of The College of Physicians of Philadelphia, CC BY-NC-SA 3.0
	http://www.cppdigitallibrary.org/items/show/2593 . RECHTS: Quadrant-elektrometer, gebouwd door Pierre Curie. Sciene Museum London. Mrjohncummings, CC BY-SA 2.0,
	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quadrant_electrometer_built_by_Pierre_Curie,_1880-1890._(9660571325).jpg .
Figuur 40	tekening van de hand van Marie Curie voor een lezing aan de Sorbonne in 1904. Publiek domein.
Figuur 41	Jędrzej Pełka, publiek domein.
	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blenda_smolista6.jpg?uselang=n l.
Figuur 42	Foto uit 1904, publiek domein.
Figuur 43	Foto gevonden op http://www.parisru.es.com/rues06/paris-avant-06-rue-dauphine.html . Publiek domein (foto van 1900).
Figuur 44	Wellcome Library, CC BY 4.0.
	http://catalogue.wellcomelibrary.org/record=b1097763 .
Figuur 45	Publiek domein.
Figuur 46	Publiek domein.
Figuur 47	Marie Curie, <i>Traité de Radioactivité</i> . Parijs, uit 1910. Publiek domein.
Figuur 48	Rutherford E, Royds T (1909) <i>XXI. The nature of the α particle from radioactive substances</i> , Philosophical Magazine 17, 281-286. Publiek domein.
Figuur 49	Publiek domein.
Figuur 50	Eigen werk.
Figuur 51	Foto uit 1905. Wellcome Images,
	http://wellcomeimages.org/indexplus/image/L0014629.html , CC BY 4.0
Figuur 52	Geiger H, Marsden E (1913) <i>The laws of deflexion of α particles through large angles</i> , Philosophical Magazine 25, 604-623, publiek domein
Figuur 53	Eigen werk.
Figuur 54	Foto's alle publiek domein.
Figuur 55	Eigen werk.
Figuur 56	Beide foto's publiek domein.
Figuur 57	Eigen werk.
Figuur 58	Eigen werk.
Figuur 59	Eigen werk.
Figuur 60	Publiek domein.
Figuur 61	Eigen werk.
Figuur 62	M0015316 Experiments by Blackett in a Wilson Cloud Chamber. Wellcome Library, London. Wellcome Images http://wellcomeimages.org . CC BY 4.0 /.
Figuur 63	Beide beelden publiek domein.
Figuur 64	Publiek domein.

- Figuur 65 James Lebenthal, Flickr, publiek domein.
<http://www.flickr.com/photos/25053835@N03/4406405576/>
- Figuur 66 Thomson JJ, Philosophical Magazine, 44, 293 (1897). Publiek domein.
- Figuur 67 Links: Thomson JJ (1921) *Rays of positive plectricity and their application to chemical analyses*, Longmans, Green and Co, London. 2de druk.
 Rechts: Kkmurray, Wikipedia, CC BY-SA 3.0'
- Figuur 68 Eigen werk.
- Figuur 69 Publiek domein.
- Figuur 70 Publiek domein.
- Figuur 71 Publiek domein.
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1922/aston.html.
- Figuur 72 Jeff Dahl, Wikipedia CC BY-SA 3.0,
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Early_Mass_Spectrometer_\(replca\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Early_Mass_Spectrometer_(replca).jpg)
- Figuur 73 Los Alamos National Laboratory, United Stated Department of Energy.
 Publiek domein. <http://www.lanl.gov/resources/web-policies/copyright-legal.php>
- Figuur 74 Lewis, G. N. *The Atom and the Molecule*. J. Am. Chem. Soc. 1916, 38, 762-785. Publiek domein.
- Figuur 75 Lewis, G. N. *The Atom and the Molecule*. J. Am. Chem. Soc. 1916, 38, 762-785. Publiek domein.
- Figuur 76 Publiek domein.
- Figuur 77 Nobelstichting, Publiek domein.
http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1932/langmuir-bio.html
- Figuur 78 Eigen werk.
- Figuur 79 Eigen werk.
- Figuur 80 Schilderij door Sir Hubert van Herkomer, nu in het Glasgow Museum.
 Publiek domein.
<http://www.theglasgowstory.com/image.php?inum=TGSE00939>
- Figuur 81 Publiek domein. <http://maxpixel.freegreatpicture.com/Fuel-Hot-Charcoal-Fire-Burn-Carbon-Heat-Embers-1618255>
- Figuur 82 MeNS 89, <http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89>
- Figuur 83 MeNS 89, <http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89>
- Figuur 84 Clendening History of Medicine Library, University of Kansas Medical Center.
- Figuur 85 Publiek domein.
- Figuur 86 Alle delen publiek domein.
- Figuur 87 Jan Homann, CC BY-SA 3.0
https://nl.wikipedia.org/wiki/Waterstofspectrum#/media/File:Visible_spectrum_of_hydrogen.jpg
- Figuur 88 MeNS 44 en 94, , <http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=44>
<http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=94>
- Figuur 89 Publiek domein.
- Figuur 90 Deglr6328, Wikipedia, CC BY-SA 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hafnium_bits.jpg.

Figuur 91	Benjamin Couprie, Institut International de Physique Solvay, Brussels, Belgium. Publiek domein.
Figuur 92	A. B. Lagrelius & Westphal, Stockholm, 1919. Publiek domein.
Figuur 93	Links: Publiek domein Rechts: P. Zeeman; Nature, vol. 55, 11 February 1897, pg. 347)– publiek domein.
Figuur 94	Publiek domein.
Figuur 96	Eigen werk.
Figuur 95	Eigen werk.
Figuur 97	Publiek domein.
Figuur 98	Publiek domein.
Figuur 99	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89
Figuur 100	Wikipedia, Publiek domein https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Young_Diffraction.png
Figuur 101	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89
Figuur 102	Bewerkt van Pieter Kuiper, Wikipedia, publiek domein. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SodiumD_two_double_slits.jpg
Figuur 103	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89
Figuur 104	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89
Figuur 105	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89
Figuur 106	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89
Figuur 107	Mstroeck en Bryn C, Wikipedia, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:C60a.png
Figuur 108	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89
Figuur 109	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89
Figuur 110	Links: Robertson, Smithsonian Institute, Publiek domein. http://www.flickr.com/photos/25053835@N03/2551920224/ Rechts: Publiek domein.
Figuur 111	Österreichische Nationalbank – Publiek domein.
Figuur 112	Erwin Schrödinger (1948) What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell, Cambridge, University Press.
Figuur 113	NASA, Clementine-missie. Publiek domein.
Figuur 114	MeNS 89, naar Dhatfield, Wikipedia, CC BY-SA 3.0. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Schrödingers_cat.svg
Figuur 115	MacTutor, Wikipedia, Publiek domein. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heisenberg_10.jpg
Figuur 116	Publiek domein
Figuur 117	Links: Publiek domein. Rechts: Longbow4u, Wikimedia, CC BY-SA 3.0 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:G%C3%B6ttingen-Grave.of.Max.Born.jpg .
Figuur 118	Beide foto's publiek domein.
Figuur 119	Publiek domein.
Figuur 120	haade, Wikipedia, CC BY-SA 3.0 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Single_electron_orbitals.jpg .
Figuur 121	Maschen, Wikipedia, Publiek domein https://en.wikipedia.org/wiki/Spin-%C2%BD#/media/File:Spin_half_angular_momentum.svg .

- Figuur 122 United States Department of Energy, Flickr, publiek domein.
<http://flickr.com/photos/37916456@N02/10555706664>.
- Figuur 123 AIP Emilio Segrè Visual Archives, met toelating.
- Figuur 124 Florian DO, Wikipedia, CC BY-SA 3.0.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wideroe_linac_en.svg.
- Figuur 125 SLAC National Accelerator Laboratory, Flickr, CC BY 2.0.
<https://www.flickr.com/photos/slaclab/8282691262>.
- Figuur 126 MeNS 89, <http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89>
- Figuur 127 Talifero; publiek domein
- Figuur 128 Mike Peel (www.mikepeel.net). CC BY-SA-4.0.
- Figuur 129 Nobel Foundation, publiek domein.
- Figuur 130 Nobel Foundation, publiek domein.
- Figuur 131 U.S. Patent 1,948,384 -- Ernest O. Lawrence -- Method and apparatus for the acceleration of ions (1934). Publiek domein.
- Figuur 132 Eigen werk.
- Figuur 133 Links: Nobel Foundation, Publiek domein.
 Rechts: Paul Dirac, *Principle of Quantum Mechanics*, Oxford, Clarendon Press, 4de herziene druk, uit 1958.
- Figuur 134 Mrjohncummings, Science Museum London
 (<http://www.flickr.com/people/98833223@N00>), Science and Society Picture library (<http://www.scienceandsociety.co.uk>), CC BY-SA 2.0
- Figuur 135 Links: Nobel Foundation, Publiek domein.
 Rechts: Anderson, Carl D. (1933). "The Positive Electron". *Physical Review* 43 (6): 491–494. DOI:10.1103/PhysRev.43.491
- Figuur 136 Nobel Foundation; Publiek domein.
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1948/blackett-bio.html
- Figuur 137 Surgeon Oscar Parkes, Publiek domein.
- Figuur 138 U.S. Naval Historical Center. Publiek domein.
<http://www.history.navy.mil/our-collections/photography/numerical-list-of-images/nhhc-series/nh-series/NH-63000/NH-63077.html>
- Figuur 139 Image M0011596, Wellcome Library, London
 (<http://wellcomeimages.org>), CC BY 4.0
- Figuur 140 New York Tribune. Issue of Nov. 5, 1917, pg. 14.
- Figuur 141 David Wilson - <http://www.firstworldwar.com/posters/uk.htm>, Publiek domein
- Figuur 142 Foto door N.J. Boon, Nederland, februari 1915. Project Gutenberg eBook, The New York Times Current History: the European War, February, 1915.
<http://www.gutenberg.org/files/18880> - Publiek domein
- Figuur 143 Links: Bundesarchiv, Bild 146-1978-069-26A / CC-BY-SA 3.0.
 Rechts: Lenard, Philipp (1944). *Deutsche Physik in vier Bänden* (in German). J.F. Lehmann
- Figuur 144 Fermilab, U.S. Department of Energy, publiek domein.
- Figuur 145 ajitkumar.bhopa, Wikipedia. CC BY-SA 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turbine_Rotor.jpeg
- Figuur 146 Boven: Cadmium, Wikimedia, Publiek domein.
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Alpha1spec.png>.
 Onder: aangepast van Neary GJ (1940) The β -Ray Spectrum of Radium E, *Roy. Phys. Soc. (London)*, A175, 71 (1940).

Figuur 147	Beide foto's publiek domein.
Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.	Publiek domein.
Figuur 148	Aangepast naar Bdushaw, Wikipedia, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ReidPotential.jpg ,
Figuur 149	Eigen werk.
Figuur 150	Nobel foundation – Publiek domein http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1949/yukawa-bio.html
Figuur 151	Bron: Argonne National Laboratory ; publiek domein. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:First_neutrino_observation.jpg http://www.anl.gov/Science_and_Technology/History/Anniversary_Frontiers/86photo.html
Figuur 152	Wiso, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gargamelle.jpg
Figuur 153	Publiek domein.
Figuur 154	Beide foto's: Nobelstichting, publiek domein. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1959/chamberlain-bio.html http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1959/segre-bio.html Bron publicatie: Chamberlain, O., Segrè, E., Wiegand, C., & Ypsilantis, T. (1955). Observation of antiprotons. Physical Review, 100(3), 947.
Figuur 155	Joi, Wikipedia, CCBY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MurrayGellMannJ11.jpg .
Figuur 156	和平奮鬥救地球, Wikipedia, CC BY-SA 4.0, https://en.wikipedia.org/wiki/George_Zweig#/media/File:George_Zweig.jpg .
Figuur 157	Eigen werk.
Figuur 158	R. P. Feynman (1939) "Forces in molecules", Phys. Rev. 56, 340.
Figuur 159	Tamiko Thiel 1984, Wikipedia, publiek domein, https://en.wikipedia.org/wiki/File:RichardFeynman-PaineMansionWoods1984_copyrightTamikoThiel_bw.jpg .
Figuur 160	Links: US Department of Energy, publiek domein. Rechts: The National Archives UK Flickr, publiek domein. http://flickr.com/photos/31575009@N05/3008584302
Figuur 161	Nobel Foundation, publiek domein. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/schwinger-bio.html http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/tomonaga-bio.html .
Figuur 162	NASA, publiek domein. http://grin.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2004-00012.html
Figuur 163	Gianca97, Wikipedia, CC BY 3.0, https://it.wikipedia.org/wiki/File:Richard-feynman.jpg
Figuur 164	Gerhard Hund, zoon van onderzoeker Friedrich Hund, Wikipedia, CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bohr_Heisenberg_Pauli_Meitner_u.a._1937.jpg?uselang=nl .
Figuur 165	MeNS 89, http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89 .
Figuur 166	Eigen werk.

- Figuur 167 Links: Joel Holdsworth, Wikipedia, publiek domein,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta_Negative_Decay.svg
 Rechts: Thymo, Wikipedia, publiek domein,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Muon_Decay.svg.
- Figuur 168 Links: Nederlands Nationaal Archief, 2.24.01.07 253-8884, CC BY-SA 3.0
 (bewerkt)
<http://proxy.handle.net/10648/ad8b9a92-d0b4-102d-bcf8-003048976d84>
 Rechts: Markus Pössel, Wikipedia, CC BY-SA 3.0,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carlo_Rubbia_2012.jpg.
- Figuur 169 Bengt Nyman - Flickr: IMG_7502, CC BY 2.0,
<http://flickr.com/photos/97469566@N00/11253392096>.
- Figuur 170 Pnicolet, Wikipedia, CC Y-SA 3.0,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Robert_Brout.jpg.
- Figuur 171 Englert F. and Brout R. (1964) Broken Symmetry and the Mass of Gauge
 Vector Mesons Phys. Rev. Lett. 13, 321
 Higgs P.W. (1964) Broken Symmetries and the Masses of Gauge
 Bosons, Phys. Rev. Lett. 13, 508
 Guralnik G. S., Hagen C. R. and Kibble T. W. B. (1964) Global
 Conservation Laws and Massless Particles, Phys. Rev. Lett. 13, 585
- Figuur 172 Links: FNAL, Wikipedia, public domein,
<http://home.fnal.gov/~dawson/themes/backgrounds/1024/leon.lederman.jpg>,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leon_M._Lederman.jpg?uselang=de,
 Rechts: Leon M. Lederman and Dick Teresi [1993]. *The God Particle: If the Universe is the Answer, What is the Question?* Boston: Houghton
 Mifflin Company. ISBN 0-61871-168-6.
- Figuur 173 MeNS 89, <http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=89>.
- Figuur 174 United States Department of Energy, Publiek domein.
<https://www.flickr.com/photos/departmentofenergy/12000977644/>
- Figuur 175 Electronics magazine, McGraw-Hill Publishing Co., New York, Vol. 15,
 No. 2, February 1942, p. 22 – Publiek domein.
<http://www.americanradiohistory.com/Archive-Electronics/40s/Electronics-1942-02.pdf>.
- Figuur 176 McMillan, US Patent US 2615129 A, 21 oktober 1952.
- Figuur 177 copyright © Synchrotron Soleil,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SOLEIL_le_01_juin_2005.jpg.
- Figuur 178 Copyright © EPSIM 3D/JF Santarelli, Synchrotron Soleil.
- Figuur 179 SCZenz, Wikipedia, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UA1.jpg>.
- Figuur 180 Michiel1972, Zykure en RokerHRO, Wikipedia, CC BY-SA 2.0,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Location_Large_Hadron_Collider.PNG.
- Figuur 181 Arpad Horvath, Wikipedia, CC BY-SA 2.5,
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LHC.svg>.
- Figuur 182 CERN, CC BY-SA 3.0, <http://cdsweb.cern.ch/record/628469>.
- Figuur 183 MeNS 65, <http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=65>
- Figuur 184 Eigen werk.
- Figuur 185 MeNS 65, <http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=65>

- Figuur 186 MeNS 65, <http://www.biomens.eu/index.php?p=mens&nr=65>
- Figuur 187 (foto en legende) EFDA JET, Wikipedia, CC BY-SA 3.0
- Figuur 188 Eigen werk.
- Figuur 189 Eigen werk.
- Figuur 190 ESA/Hubble & NASA, publiek domein. Bewerkt door Bulwersator voor Wikipedia.
http://apod.nasa.gov/apod/image/1112/lensshoe_hubble_3235.jpg,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lensshoe_hubble.jpg.
- Figuur 191 NASA, publiek domein.
- Figuur 192 European Space Agency & NASA Acknowledgements: Project Investigators for the original Hubble data: K.D. Kuntz (GSFC), F. Bresolin (University of Hawaii), J. Trauger (JPL), J. Mould (NOAO), and Y.-H. Chu (University of Illinois, Urbana) Image processing: Davide De Martin (ESA/Hubble) CFHT image: Canada-France-Hawaii Telescope/J.-C. Cuillandre/Coelum NOAO image: George Jacoby, Bruce Bohannon, Mark Hanna/NOAO/AURA/NSF – CC BY 3.0,
<http://www.spacetelescope.org/news/html/heic0602.html>,
<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2006/10/image/a>.
- Figuur 193 Publiek domein.
- Figuur 195 Eigen werk.
- Figuur 196 Mimooh, Wikipedia. CC BY-SA 3.0.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mirror_woman_pretty_ugly_by_mimooh.svg.
- Figuur 196 Chris Potter, Flickr, CC BY 2.0
<https://www.flickr.com/photos/86530412@N02/7984171587>.
- Figuur 197 Japs 88, Wikipedia, CC BY-SA 3.0.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prototype_kilogram_replica.JPG.
- Figuur 198 MeNS 86
- Figuur 199 Linksboven: Betsythedevine, Wikipedia, CC BY-SA 2.5
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GabrieleVeneziano.jpg>
 Rechtsboven: Gitte Post, Wikipedia, CC BY 3.0,
<http://www.rustonline.dk/2012/11/06/holger-bech-nielsen-professor-pa-fuld-tid/>
 Linksonder: Acmedogs, Wikipedia, CC BY-SA 3.0,
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:LeonardSusskindStanfordNov2013.jpg>.
 Rechtsonder: Betsythedevine, Wikipedia, CC BY-SA 3.0,
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:YoichiroNambu.jpg>.
- Figuur 200 Spiritia, Wikipedia, publiek domein;
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hypercube-construction-4d.png>.
- Figuur 201 Publiek domein.
- Figuur 202 Josh Sorenson, pexels.com, publiek domein,
<https://www.pexels.com/photo/sunset-beach-ocean-panorama-96798/>.
- Figuur 203 Bron: Andrew J. Hanson, Indiana University, Wikipedia, CC BY-SA 3.0,
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:CalabiYau5.jpg>.
 Voor meer informatie kan u terecht in de oorspronkelijke publicatie: A.J. Hanson, "A Construction for Computer Visualization of Certain Complex Curves," in "Computers and Mathematics" column, ed. Keith Devlin, of Notices of the American Mathematical Society, 41, No. 9, pp. 1156--1163

- (American Math. Soc., Providence, november/december, 1994).
<https://www.cs.indiana.edu/~hansona/papers/CP2-94.pdf>
- Figuur 204 Links: Konrad Jacobs, Erlangen. Copyright: MFO, CC BY-SA 2.0 Germany. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eugenio_Calabi.jpeg, <http://owpdb.mfo.de/>.
 Rechts: Lubos Motl, Lumidek, Wikipedia, Publiek domein, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shing-Tung_Yau_at_Harvard.jpg.
- Figuur 205 Peter Woit (2006) *Not Even Wrong - The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*, Basic Books, ISBN 13: 9780465092758
- Figuur 206 Linfoxman, Wikipedia, publiek domein, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Loop_quantum_gravity.jpg
- Figuur 207 Links: Temugin, Wikipedia, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CarloRovelli.JPG>.
 Rechts: Lumidek, Wikipedia, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LeeSmolinAtHarvard.JPG?uselang=fr>.
- Figuur 208 Charles-Philippe Larivière (1798-1876), Achilles presenting the prize of Wisdom to Nestor during the Funeral Games, Musée d'Art Classique de Mougins, Frankrijk