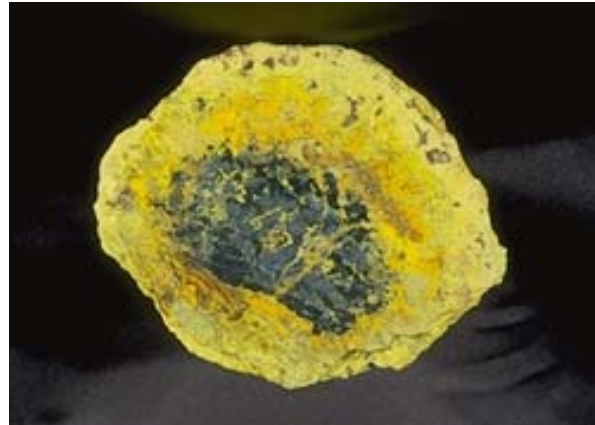


# DE ONTDEKKINGEN: VAN URANIUM TOT KERNSPLIJTING

**1759**

De Duitse chemicus Martin Heinrich Klaproth ontdekt in 1759 een stof die hij noemt naar de goddelijke vader van de titanen uit de Griekse mythologie: Uranus. Zowel hij als de rest van de wetenschappelijke gemeenschap denkt dat hij zuiver uranium heeft geïsoleerd. Pas veel later wordt duidelijk dat het uraniumoxide ( $UO_2$ ) betreft (dat is zoiets als het verschil tussen ijzer en roest - ijzeroxide. De Franse chemicus Eugène-Melchior Péligot toont in 1841 aan dat het zwarte poeder van Klaproth geen metaal is door als eerste het zilverwitte uraniummetaal te isoleren in een laboratorium. Het bestaan van ioniserende of radioactieve straling is (nog) niet bekend. Dat uranium een radioactieve stof is, is dus ook niet bekend. Rond 1830 ontdekt men dat het uraniumoxide gebruikt kan worden voor het maken van gele en rode glazuren in de glas- en aardewerkindustrie.

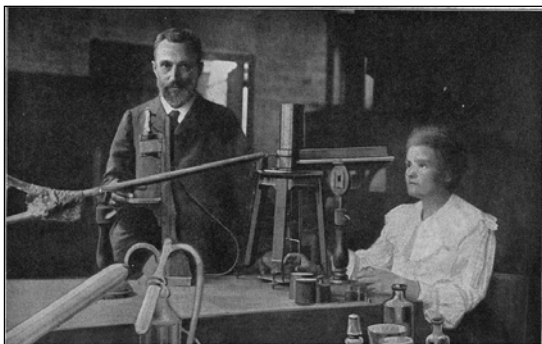


**1895**

Röntgenstraling, vernoemd naar Wilhelm Conrad Röntgen, is de eerste vorm van ioniserende straling die wordt ontdekt, op 8 november 1895. Na een jaar heeft de fysicus het onderzoek naar de stralen afgerond en drie wetenschappelijke artikelen hierover gepubliceerd. Zijn studie van de stralen is zo diepgaand dat het nog 17 jaar zal duren voordat er wezenlijk nieuwe gegevens toegevoegd worden. Max von Laue ontdekt en beschrijft in 1912 de verstrooiing van röntgenstraling aan kristallen. Röntgen ontvangt in 1901 de Nobelprijs voor de Natuurkunde, Von Laue in 1914.

**1896**

De Franse natuurkundige Antoine Henri Becquerel ontdekt in 1896 per toeval radioactiviteit. Becquerel stelt in een proefopstelling een kristal uraniumzout, een stof waarvan Becquerel denkt dat die fluorescerend is, enige tijd bloot aan het zonlicht en legt hem vervolgens op een fotografische plaat. De plaat blijkt inderdaad gezwart te zijn. Zijn echte ontdekking doet Becquerel pas nadat hij zijn proefopstelling al heeft opgeruimd en opgeborgen; de sporen zijn nog steeds zichtbaar op de plaat. Na verder onderzoek door Marie en Pierre Curie wordt dit verschijnsel radioactiviteit genoemd. De Curies bestuderen radioactieve materialen, met name uraniumerts, ook wel uraniet of pekblende genoemd, het mineraal waaruit Klaproth uranium isoleerde. Pekblende blijkt sterker radioactief te zijn dan het uranium en thorium dat eruit wordt gewonnen. De logische verklaring hiervan is dat pekblende sporen van een andere, onbekende, radioactieve stof moet bevatten, die veel meer straling produceert dan uranium.



Pierre en Marie Curie

Uiteindelijk isoleren zij twee nieuwe scheikundige elementen. Het eerste element wordt (in 1898)

polonium genoemd naar Maries geliefde en onderdrukte vaderland Polen. Het tweede element noemen ze (op 26 december van datzelfde jaar) radium, vanwege de intense radioactiviteit van het element. In 1903 ontvangen Becquerel en de Curies de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor hun werk.

### 1897

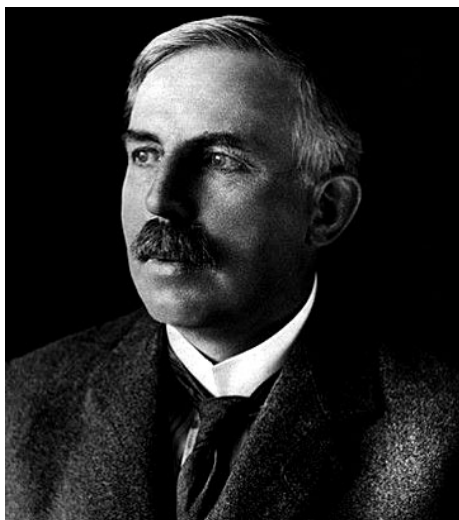
Een jaar na Becquerels ontdekking van radioactiviteit ontdekt Joseph John Thomson het bestaan van het elektron. Thomson kondigt zijn ontdekking aan op een vrijdagavondbijeenkomst in Londen van het genootschap dat de Royal Institution heet, op 30 april 1897. Het elektron wordt ontdekt als het eerste van de elementaire deeltjes, vóór het proton en het neutron, de andere twee bouwstenen van het atoom. Thomson

voert zijn baanbrekende experiment uit in Cambridge. De ontdekking van het elektron is niet een eenmanszaak, maar een wedloop waarin Engelse, Duitse, Franse en Nederlandse natuurkundigen strijden om de verklaring van dat wonderlijke verschijnsel dat elektriciteit heet. Elektricititeit wordt aan het eind van de negentiende eeuw al op grote schaal toegepast: grote steden hebben elektrische verlichting, er rijden elektrische trams en de industrie maakt gebruik van elektrisch aangedreven machines. Voor deze toepassingen is het niet nodig te weten waar elektriciteit uit bestaat. Het experiment van Thomson toont aan dat de massa van een elektron duizend keer kleiner is dan de destijds kleinst bekende waarde, die van het waterstof-ion. Latere metingen (ook van Thomson, in 1899) tonen aan dat het elektron dezelfde lading heeft als het waterstof-ion. Dat ze tegengesteld zijn, respectievelijk negatief en positief, wordt in 1911 door de Nieuw-Zeelandse wetenschapper Ernest Rutherford vastgesteld. De conclusie is dat de elektrische stroom bestaat uit deeltjes die duizend keer lichter zijn dan het lichtste atoom. Het eerste elementaire deeltje is ontdekt.



### 1898

Ernest Rutherford wordt ook wel als de vader van de kernfysica beschouwt. In 1898 ontdekt hij dat de straling van radioactief materiaal uit twee soorten bestaat, die hij alfa ( $\alpha$ ) en bèta ( $\beta$ ) noemt. Vier jaar later komt hij met de theorie dat deze straling veroorzaakt wordt door veranderingen in atomen.



Na de vinding van X-stralen door Röntgen en radioactiviteit van uraniumzouten door Becquerel springen veel onderzoekers op de nieuwe ontdekkingen en proberen nieuwe dingen te vinden, elementen, en 'stralen'. De experimenten met radioactiviteit van de Franse natuurkundige Paul Villard leiden in 1900 tot de onverwachte ontdekking van nog een ander soort stralen. Villard herkent ze als zijnde verschillend van X-stralen, omdat ze een veel grotere doordringende kracht hebben. Hij ontdekt dat ze worden uitgestoten door radioactieve stoffen en niet worden beïnvloed door elektrische of magnetische velden. Rutherford geeft deze stralen vervolgens de naam gammastralen ( $\gamma$  stralen) mee.

### 1900

In 1900 gaat de Engelse radiochemicus Frederick Soddy werken aan radioactiviteit bij Rutherford in Canada. Ze ontdekken dat het instabiele karakter van radioactieve elementen het gevolg is van

verval in andere elementen en dat bij dit verval ook alfa-, bèta- en gammastraling ontstaat. In 1903 stelt Soddy samen met Sir William Ramsay vast dat het verval van radium helium oplevert. Frederick Soddy doceert van 1904 tot 1914 aan de Universiteit van Glasgow en daar toont hij aan dat uranium naar radium vervalt. Ook toont hij aan dat een radioactief element meer dan één atoomgewicht kan hebben met dezelfde chemische eigenschappen. Dit leidt tot het concept van de isotoop: het aantal protonen in de kern van een atoom bepaalt wat voor stof het is. Het aantal protonen komt overeen met het atoomgetal of het atoomnummer. Waterstof (H) heeft bijvoorbeeld het atoomgetal 1 en zuurstof (O) 16. Omdat de lading van een stof 0 moet zijn, betekent dit dat in een atoom altijd evenveel protonen als elektronen zijn. Maar het aantal neutronen, de neutrale kerndeeltjes, kan verschillen. Oftewel, in een atoom staat het aantal protonen en elektronen vast, maar het aantal neutronen kan dus variëren. Een isotoop is dus een variatie van het aantal neutronen binnen één element. Uranium heeft het atoomgetal 92, dus 92 protonen, maar het aantal neutronen kan variëren: U235 (143 neutronen), U238 (146 neutronen). Het zal echter nog tot 1932 duren eer het neutron daadwerkelijk wordt aangetoond door een leerling van Rutherford. Later toont Soddy aan dat ook niet-radioactieve elementen meerdere isotopen kunnen hebben. Daarbij laat hij zien dat het atoomgetal van een atoom twee plaatsen daalt bij de uitstoot van een alfadeeltje en een plaats stijgt bij de uitstoot van een bètadeeltje. Een alfadeeltje bezit twee protonen, dus na uitzending van een alfadeeltje daalt het atoomnummer twee eenheden. Een bètadeeltje wordt uitgezonden nadat een neutron wordt omgezet in een proton. Het nieuw gevormde element stijgt dus een plaats, maar om elektrisch neutraal te worden moet het een elektron (bètadeeltje) uitzenden. Deze ontdekkingen zijn een fundamentele stap naar het begrijpen van de relatie tussen de categorieën van radioactieve elementen en hun vervalschema's. Soddy ontvangt in 1921 de Nobelprijs voor de Scheikunde voor zijn onderzoek naar radioactief verval en vooral voor het formuleren van de isotopentheorie.

### 1905

In 1905 dient Albert Einstein zijn proefschrift in aan de universiteit van Zurich: het gaat over de bepaling van de grootte van atomen. Daarnaast schrijft hij datzelfde jaar vijf artikelen voor publicatie, waarvan drie bijzonder beroemd worden. Ze brengen een revolutie teweeg in de fysica. De meeste natuurkundigen zijn het erover eens dat deze artikelen over de beweging van moleculen (Brownse beweging), het foto-elektrisch effect en de relativiteitstheorie elk een Nobelprijs waard zouden zijn. Hij verklaart de Brownse beweging uit de beweging van de moleculen ten gevolge van de warmte en geeft het theoretische kader van het sluitende bewijs voor het bestaan van atomen. Met zijn (speciale) relativiteitstheorie laat hij zien dat we onze begrippen van ruimte en tijd moeten herzien en etaleert hij een allesomvattende theorie van mechanische en elektromagnetische fenomenen. In verband hiermee toont hij de equivalentie van massa en energie aan, later geformuleerd als  $E = mc^2$ .



De wereldgemeenschap van fysici beschouwt 1905 als het “wonderjaar”, het geboortjaar van de kwantummechanica, de statistische mechanica en de relativiteitstheorie, drie hoekstenen van de moderne fysica. Hoewel Einstein veel bekender is geworden door zijn relativiteitstheorie, kreeg hij in 1921 de prijs voor zijn werk over het foto-elektrisch effect.

### **1911**

Ernest Rutherford stelt rond 1911 vast dat het atoom bestaat uit een aantal subatomaire deeltjes waaronder deeltjes met een positieve lading (protonen) en deeltjes met een negatieve lading (elektronen). Het is echter nog niet duidelijk hoe het atoom uit deze deeltjes is opgebouwd. Op basis van zijn experimenten stelt Rutherford een atoommodel op, waarbij hij het atoom omschrijft als een positief geladen kern van protonen met daaromheen een wolk van elektronen. (Later, in de jaren 20, bewijst hij op basis van proefondervindelijk onderzoek dat het atoom een kleine, massieve kern moet bevatten) Vanaf 1912 gaat Niels Bohr met hem samenwerken. Bohr combineert Rutherfords atoomtheorie met de kwantumtheorie van Max Planck en vormt zo de grondslag voor de moderne kernfysica.

### **1912**

In 1912 komt er veel schot in het onderzoek naar hoogenergetische deeltjes (bijv. bètadeeltjes) als de Schotse fysicus C.T.R. Wilson de wolkenkamer (Wilsonkamer) bedenkt. De algemene procedure is om water te laten verdampen in een afgesloten container tot het verzadigingspunt en vervolgens de druk te verlagen, waardoor een superversadigd volume van lucht wordt geproduceerd. Vervolgens blijkt dat de passage van een geladen deeltje door deze ruimte leidt tot de condensatie van de damp in kleine druppels, waarbij de baan van het deeltje zichtbaar wordt gemaakt. De Wilsonkamer wordt wijd en zijd gebruikt voor de bestudering van radioactiviteit. Een alfadeeltje laat een breed, recht pad van een bepaalde lengte achter, terwijl een elektron een lichtbaan met buigingen als gevolg van de botsingen laat zien. Gammastralen produceren geen zichtbare baan daar ze erg weinig ionen produceren in de lucht. Wilson krijgt voor zijn vinding in 1927 de Nobelprijs.

### **1914**

In 1914 toont Rutherford aan dat gammastraling een vorm van elektromagnetische straling is, zoals ultraviolet licht en röntgenstraling, maar dan met een hogere energie en een kortere golflengte dan röntgenstralen. De scheidslijn tussen röntgenstraling en gammastraling is echter niet duidelijk gedefinieerd. In het algemeen spreekt men van röntgenstraling tussen golflengtes van ongeveer 0,01 en 4,5 nanometer ( $10^{-9}$  meter), ofwel straling met energie van circa een 0,5 tot 200 kilo elektronvolt (keV). Wetenschappers gaan er gewoonlijk van uit dat de term gammastraling van toepassing is voor elektromagnetische straling met energieniveaus boven de 200 keV. Alfastraling heeft een hogere ioniserende energie, maar dat zorgt er weer voor dat de straling minder doordringend is doordat onderweg alle moleculen geïoniseerd worden.

### **1919**

Rutherford is ook de eerste persoon in 1919 die het ene element omzet in een ander element, dit heet transmutatie. Hij zet stikstof om in zuurstof door de kernreactie  $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ . Tijdens zijn werk met Niels Bohr in 1921 theoretiseert Rutherford over het bestaan van neutronen, die op één of andere manier zouden kunnen compenseren voor het afstotende effect van de positieve ladingen van protonen door het veroorzaken van een aantrekkende kernkracht en dus om te voorkomen dat de kern uit elkaar zou vallen.

### **1928**

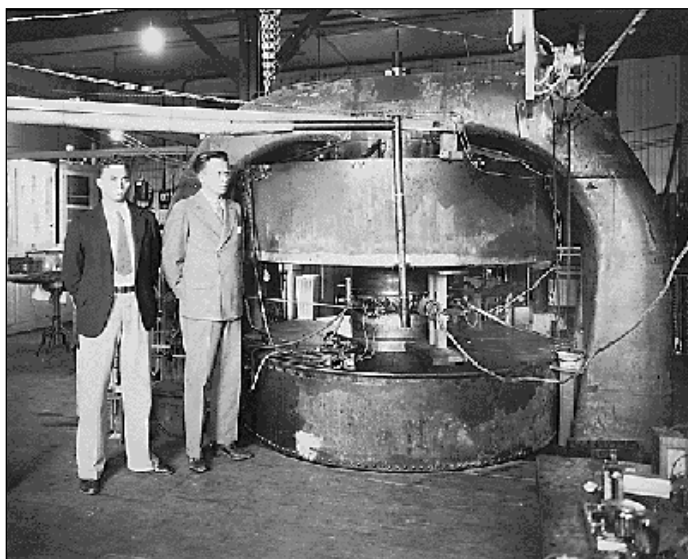
De Duitse hoogleraar Hans Geiger maakt op 9 mei 1928 samen met z'n assistent Walter Müller een buis waarmee straling geteld kan worden. In een metalen koker die voor het doorlaten van stralen een klein venstertje heeft is een metalen draad gespannen. Tussen wand en draad wordt een

elektrisch potentiaalverschil aangebracht, maar aangezien het instrument gevuld is met een slecht geleidend gas, blijft de toestand zoals het was. Wanneer er een radioactieve straal door het venster binnenkomt, veroorzaakt die in de isolerende gasmantel een zeer kortstondig ionisatiespoor. Müller vindt een telsysteem uit en daarmee is er een instrument waarmee de intensiteit van de radioactieve straling in de omgeving van de telbuis gemeten kan worden. Later heet dit de Geiger-Müller-teller en nog later afgekort tot de Geigerteller. Ze vragen geen patent aan op hun vinding, ze brengen enkel verslag uit aan hun vakgenoten en hun uitvinding wordt gemeengoed.



## 1929

Ernest Orlando Lawrence vindt in 1929, geïnspireerd door een verhandeling van de Noorse ingenieur Rolf Wideroe, in Berkeley (VS) een unieke cirkelvormige deeltjesversneller uit waar hij naar verwijst als zijn “protondraaimolen,” maar die beter bekend wordt als de cyclotron. De eerste cyclotron is een taartvormig brouwsel van glas, zegellak en brons. Ondanks het met huis-tuin-en-



Lawrence voor de cyclotron (1934)

keuken materialen in elkaar geflanste geheel bewijst de cyclotron Lawrence punt: atoomkernen kunnen worden gefragmenteerd door de snelheid van de atomen, en daarmee hun energie, flink op te voeren door ze te laten ronddraaien in de cyclotron en ze vervolgens, zoals stenen vanuit een katapult, uit te werpen naar een doel. De versnellingskamer van de eerste cyclotron heeft een diameter van circa 12 cm en voert waterstofionen op tot een energie van 80 keV. Terwijl zijn assistenten de 25 cm cyclotron ontwikkelen – een machine die de grens van 1 miljoen elektronvolt (MeV) zal breken - is Lawrence al aan het dromen over een nog grotere cyclotron.

De Engelse kernfysicus John Cockcroft ontwerpt in datzelfde jaar samen met zijn Ierse collega Ernest T. S. Walton een deeltjesversneller met een ander ontwerp principe, waarbij gebruik wordt gemaakt van potentiaalverschillen. Rutherford ontdekte eerder dat alfadeeltjes, heliumkernen, uitgezonden door radium botsen tegen het stikstof uit de lucht, wat vervolgens wordt omgezet in zuurstof en waterstofkernen. Aan Cockcroft en Walton geeft Rutherford de opdracht om een methode te vinden om atomen te splitsen zonder natuurlijke radioactiviteit. Daartoe bouwden ze met beperkte middelen een superversneller. In 1933 slagen ze erin om lithiumkernen te splitsen. In 1952 krijgen ze hiervoor de Nobelprijs in de natuurkunde.

## 1931

Robert Jemison Van de Graaff, een Amerikaanse fysicus, ontwikkelt in 1931 een deeltjesversneller in de vorm van een elektrostatische machine voor het opwekken van extreem hoge voltages. Deze Van de Graaff Generator bestaat uit een hoogvoltage station in de vorm van een metalen bol, gemonteerd aan de top van een geïsoleerde kolom. De bol kan worden opgeladen tot een potentiaal van wel 5MeV. De generator kan worden gebruikt om een bundel van elektronen, protonen, of ionen te versnellen voor het bombarderen van kernen op een klein plaatje (‘target’) die in de bundel wordt geplaatst.

### 1932

Nadat Rutherford al vanaf 1921 theoretiseert over het bestaan ervan ontdekt de Britse natuurkundige James Chadwick (en leerling van Rutherford) in 1932 het neutron. Het is een deeltje zonder elektrische lading in de kernen van alle atomen (behalve waterstof). Chadwick bereikt dat resultaat door beryllium met alfadeeltjes te beschieten. In 1935 krijgt hij de Nobelprijs.

Eveneens in 1932 ontdekt de Amerikaanse natuurkundige Carl David Anderson het bestaan van de positron. Een positron is een deeltje met dezelfde massa als dat van een elektron, maar dan met een tegengestelde lading. Hij ontdekt de deeltjes bij toeval tijdens onderzoek naar kosmische straling. Onverwacht komt hij daarbij op foto's van zijn wolkenkamer de banen van een deeltje tegen, die hij correct interpreteert als een deeltje met dezelfde massa als een elektron, maar met tegengestelde lading. Anderson moet de Nobelprijs van 1936 delen met een andere natuurkundige.

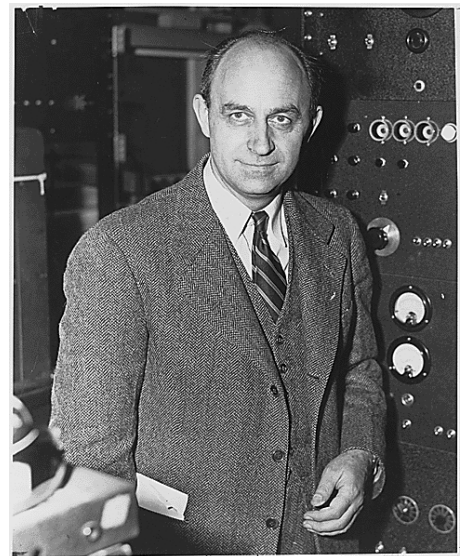
1932 is ook het jaar dat Harold Urey het bestaan van deuterium ( $^2\text{H}$  of D), een isotoop van waterstof ( $^1\text{H}$ ), aantoonde. Hij doet dat door een grote hoeveelheid vloeibaar waterstof zeer langzaam te laten verdampen en verwacht dat de zwaardere isotoop relatief meer aanwezig zal zijn in de vloeistof die over blijft. Dat blijkt ook zo te zijn: door een spectroscopische analyse is Urey in staat het nooit eerder gedetecteerde zware isotoop van waterstof te identificeren. Het nieuwe isotoop wordt al spoedig voorzien van de naam deuterium.

Een andere isotoop van waterstof, Tritium ( $^3\text{H}$  of T), wordt in 1934 voor het eerst gemaakt uit deuterium door Ernest Rutherford. Tritium komt in minieme hoeveelheden in de atmosfeer voor door interactie van kosmische straling met deuteriumkernen in waterdamp in de atmosfeer. Tritium, een giftige en net als deuterium radioactieve stof, ontstaat echter vooral in alle kernreactoren.

### 1933

In 1933 maakt de in Italië geboren Enrico Fermi zijn theorie bekend van radioactief bètaverval, waarin een neutron in een atoomkern 'vervalt', of verandert, in drie deeltjes: een proton, een elektron (bètadeeltje) en een neutrino. De neutrino, een deeltje zonder massa of elektrische lading, wordt feitelijk pas bij experimenten in de jaren vijftig daadwerkelijk aangetoond.

Een jaar later toont hij aan dat neutronen veel effectiever zijn dan heliumkernen (alfadeeltjes) om nucleaire omzettingen te induceren. Dit leidt al snel tot zijn ontdekking van meer dan 40 radioactieve isotopen. Vervolgens ontdekt hij bij toeval dat paraffine gebruikt kan worden om neutronen af te remmen en ze een paar honderd keer meer effectief te maken in het veroorzaken van omzettingen (transmutaties) van kernen. De resultaten van het beschieten van uranium met neutronen zijn interessant en raadselachtig. Enrico Fermi en zijn medewerkers zijn in 1934 de eersten die beschietingen van uraniumkernen met neutronen bestuderen maar de resultaten worden pas enige jaren later correct geïnterpreteerd. Fermi ontvangt in 1938 de Nobelprijs voor natuurkunde.

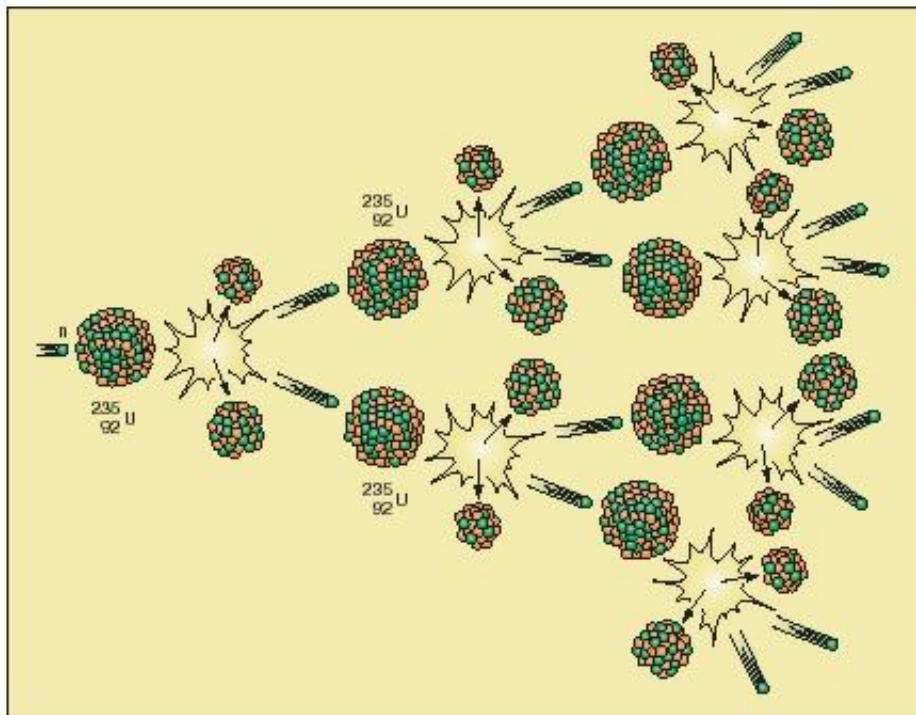


### 1939

Otto Hahn en Fritz Strassman publiceren op 16 januari 1939 in het Duitse blad 'Naturwissenschaften' (en in het februari nummer van 'Nature') een artikel over experimenten in december 1938 die geleid hebben tot de ontdekking van de uraniumsplijting. Het in de natuur voorkomende uranium kan door een neutron worden gesplitst. Het begrip 'kernsplijting' (Kernspaltung, nuclear fission) doet haar intrede. Op 26 januari 1939 wordt in Washington een conferentie gehouden over theoretische natuurkunde. Na de bijeenkomst discussieert Fermi met Niels Bohr over kernsplijting, en Fermi noemt daarbij specifiek de mogelijkheid dat hierbij ook neutronen vrij zouden kunnen komen. Hoewel dit maar een gok is, is de implicatie daarvan, het mogelijke bestaan van een kettingreactie, meteen duidelijk voor insiders. In de pers verschijnen een

aantal sensationele stukjes over dit onderwerp. Al voordat de conferentie in Washington is afgelopen zijn er verschillende andere experimenten in gang gezet om het bestaan van kernsplijting te bevestigen.

Uit vier verschillende laboratoria wordt bevestiging gepubliceerd in de Physical Review editie van 15 februari. Rond deze tijd voert ook Bohr vergelijkbare experimenten uit in zijn eigen laboratorium in Kopenhagen. Dan heeft Frédéric Joliot in Parijs zijn eerste resultaten ook al gepubliceerd in de Comptes Rendus van 30 januari 1939. Hun experimenten bevestigen de resultaten.



In maart '39 hebben al 18 teams in 5 landen de uraniumsplijting onafhankelijk van elkaar bevestigd.

Op 8 maart 1939 ontdekken Halban, Joliot en Kowarski secundaire neutronen, die cruciaal zijn voor het op gang brengen van een kettingreactie. De resultaten worden een week later bevestigd door Fermi en Szilard. In juni wordt er door Fluegge in Naturwissenschaften een artikel gepubliceerd genaamd 'Kann der Energieinhalt der

Atomkerne technisch nutzbar gemacht werden?' waarin een energie-producerende uranium-machine en een moderator wordt beschreven. Aan het eind van '39 zijn er bijna 100 wetenschappelijke 'papers' over kernsplijting gepubliceerd die, zo wordt in The Review of Modern Physics door J. Turner van Princeton samengevat, concluderen:

- 1- dat kernsplijting zeer veel energie vrijmaakt;
- 2- dat bij kernsplijting snelle neutronen vrijkomen;
- 3- het schaarse U-235 splijt en U-238 de neutron 'absorbeert';
- 4- doordat er meer dan twee neutronen vrij te komen is er kans op een kettingreactie die heel veel energie in zeer korte tijd zal vrijmaken
- 5- die kettingreactie kan gecontroleerd worden in een 'uranium-machine' bestaand uit uranium en een moderator.

Hoewel de publicaties gaan over fundamentele fysica en energieproductie, weet iedereen onmiddellijk dat er ook militaire mogelijkheden aan deze ontdekking zitten en al snel zijn in het geheim teams in Duitsland, Japan, VK, Rusland, Frankrijk en de VS bezig met onderzoek daarnaar. Fermi waarschuwt president Roosevelt en dringt er bij hem op aan snel een kernwapen te ontwikkelen voordat Duitsland daarover kan beschikken. Daarop wordt het Manhattan-project opgezet en Fermi's team in Chicago krijgt op 2 december 1942 de eerste gecontroleerde zelfonderhoudende kernreactie voor elkaar in een grafietgemoderde reactor in het Stagg Field stadion. Element 100, fermium oftewel ijzer, wordt naar Fermi vernoemd.