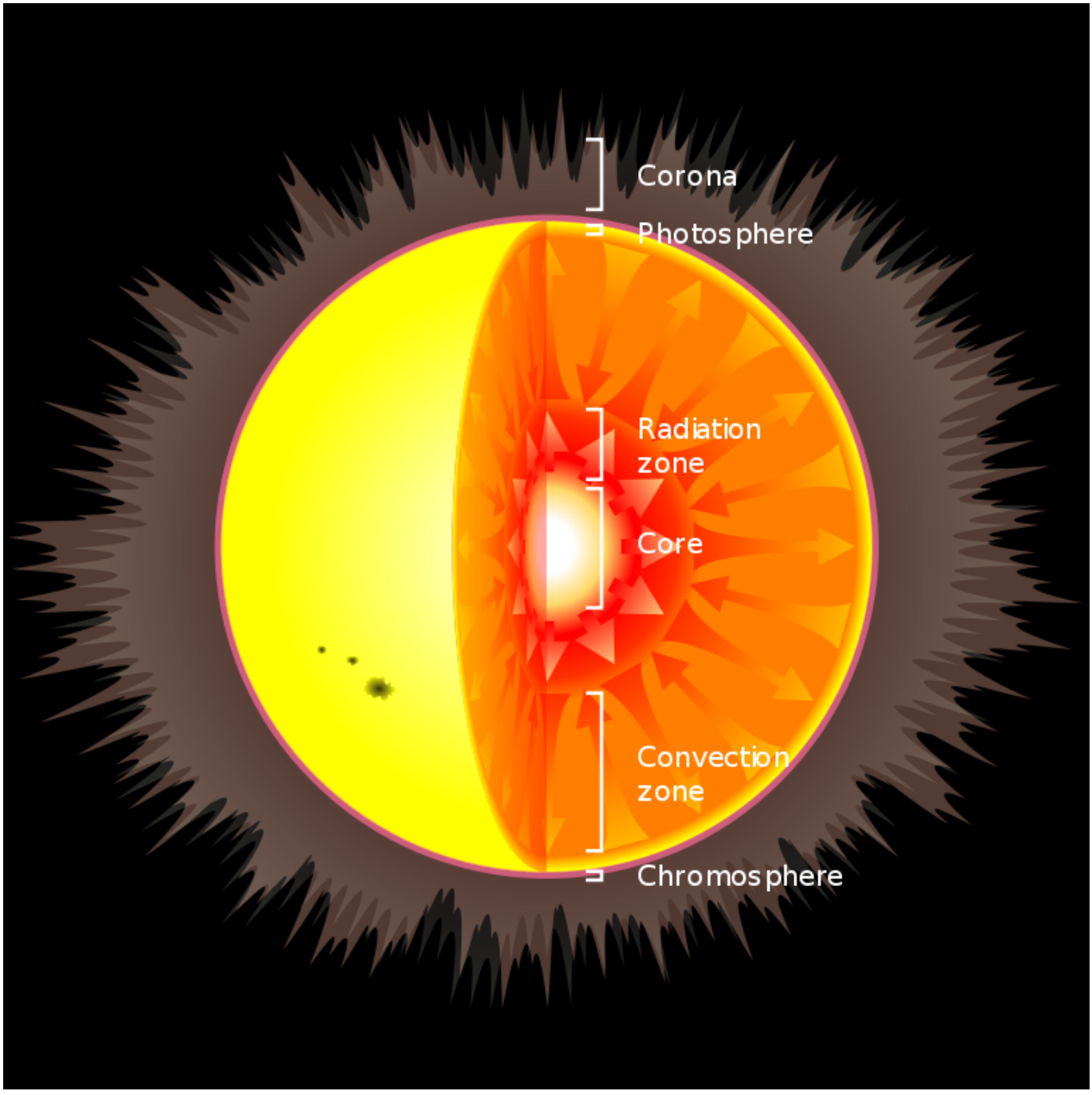
Koude fusie: feit en fictie

Het zou een bijna onuitputtelijke nieuwe bron van energie kunnen zijn: koude kernfusie. Wat kan er wel, wat kan er niet, en wat is er in het verleden al geprobeerd om koude fusie voor elkaar te krijgen?



Afbeelding 1. Kernfusie in de zon.In het centrum van de zon zijn de temperatuur en de druk beide zo hoog dat lichte atoomkernen met elkaar in botsing komen, samensmelten en daarbij enorme hoeveelheden energie opwekken. Deze energie wordt het zonnestelsel ingestuurd en ligt aan de basis van vrijwel elke vorm van energie die we op aarde kunnen gebruiken. Afbeelding: Sakurambo.

De menselijke fascinatie voor het opwekken van bruikbare energie gaat terug tot de ontdekking van het vuur, en is in de huidige context van ecologische bewustwording misschien wel relevanter dan ooit. Voor onze aluminiumfabrieken, supertankers en broodroosters gebruiken we energie – veel energie – en die halen we uit de grond, de lucht, het water, het daglicht, en natuurlijk ook uit de splijting van atoomkernen. Een mechanisme dat nog veel efficiënter is in het vrijmaken van energie, is de *fusie* van waterstofkernen in het centrum van de zon (afbeelding 1). Wanneer kernen van lichte atomen de kans krijgen om met elkaar te versmelten, komen daar via de alom bekende relatie $E = mc^2$ enorme hoeveelheden energie bij vrij. De fusiereactie is zelfs zo overweldigend succesvol dat de zon volledige planeten kan opwarmen, en dat vrijwel alle energie die we op aarde vrijmaken uit olie, met windturbines of uit bijvoorbeeld waterkrachtcentrales, indirect afkomstig is van de energie die samensmeltende kernen in de zon op de aarde afsturen.

Sinds natuurkundigen in de jaren twintig van de vorige eeuw begrepen hoe dit spectaculaire nucleaire proces in werking treedt, is het hun droom geweest om zelf een fusiereactor te bouwen op aarde: onze eigen artificiële zon, gecontroleerd in een laboratorium. Dit zou namelijk een onuitputtelijke bron van energie betekenen. Een voor de hand liggend probleem daarbij is dat het geen eenvoudige opgave is om de condities in de kern van de zon na te bootsen in de kelder van een universiteitsgebouw. De vereiste temperatuur van tientallen miljoenen Kelvins en de enorme druk die nodig zijn om waterstofkernen in botsing te brengen met elkaar, zijn beide echt wel te hoog om gewoon in een snelkookpan te bereiken.

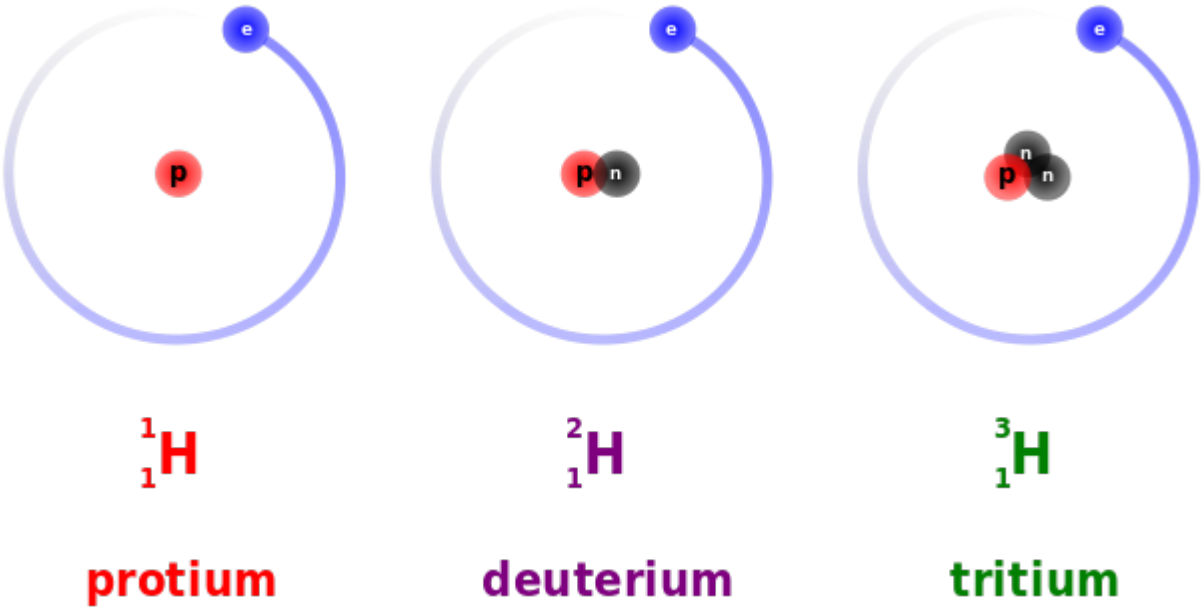
Om die reden kan zogenaamde “koude” fusie wel de heilige graal van de natuurkunde genoemd worden: een proces waarbij grote hoeveelheden energie worden gehaald uit kernfusie, zonder daarbij de thermonucleaire omstandigheden te moeten bereiken die we waarnemen in sterren. Koude fusie zou immers niet enkel een ecologische en rijke bron van “gratis” energie zijn; het zou ook nog eens eenvoudig te verspreiden zijn over de wereld, in plaats van enkel beschikbaar te zijn in gespecialiseerde laboratoria. Je hoeft geen astrofysica te begrijpen om bij die gedachte te gaan watertanden, maar is koude fusie een realistisch

doel, of is het net als de oorspronkelijke heilige graal slechts een motief uit mythen en sagen?

Elektrochemische koude fusie

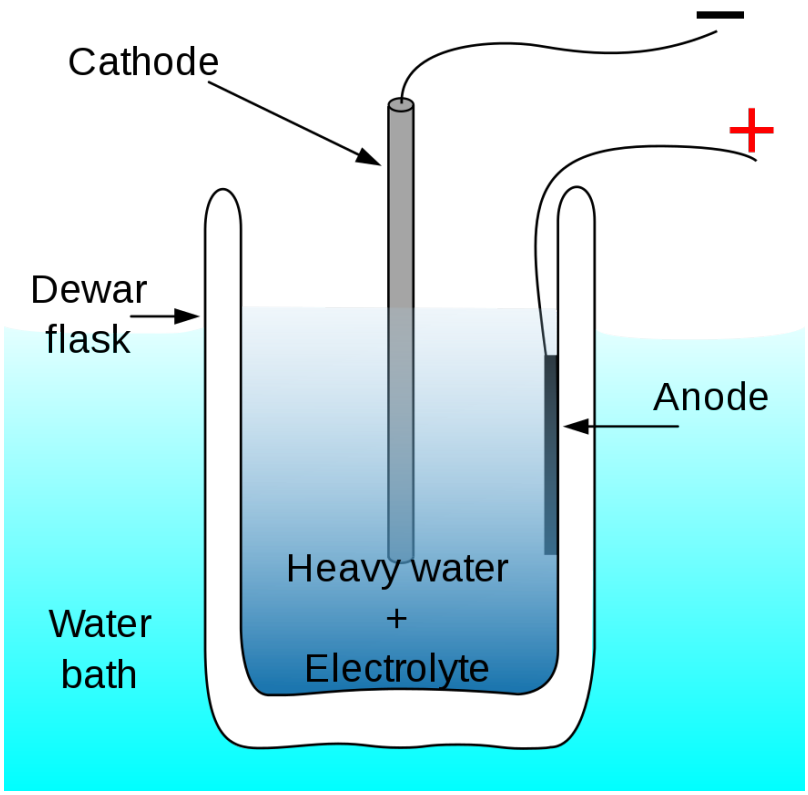
Wie twee waterstofatomen met elkaar in contact wil laten komen om hun kernen te doen samensmelten, moet ze voldoende dicht bij elkaar kunnen brengen. De positieve lading van atoomkernen heeft echter als gevolg dat ze juist zo ver mogelijk bij elkaar uit de buurt willen blijven: hoe dichter ze bijeenkomen, hoe groter de zogenaamde elektrostatische kracht wordt die ze opnieuw uiteen duwt. Het is pas op het moment dat ze “zoenen”, op een onderlinge afstand van zo’n 10^{-15} meter, dat de sterke kernkracht het wint van de elektrostatische, en fusie kan optreden. Naast een behoorlijk misplaatste romantische metafoor, is dit vooral een grote wetenschappelijke uitdaging – een uitdaging waarop Martin Fleischmann en Stanley Pons, twee elektrochemici van de Universiteit van Utah, in 1989 een oplossing gevonden dachten te hebben.

In plaats van beroep te doen op extreme temperaturen om waterstofkernen te doen botsen, meenden Fleischmann en zijn jongere collega dat ze hetzelfde resultaat konden bereiken aan de hand van elektrolyse. Bij dit elektrochemische proces wordt een gelijkstroom aangelegd door een waterbad om op die manier waterstof uit het H_2O-molecuul te winnen. In hun versie van het experiment werd een stroom gestuurd door een bad met zwaar water: watermoleculen waarvan de waterstofatomen een extra neutron hebben. (Afbeelding 2.) Van dit type atomen, deuterium genaamd, vermoedden Fleischmann en Pons dat ze de grootste kans hadden om fusie te realiseren. Het idee was om dit deuterium te doen adsorberen door een elektrode gemaakt van het metaal palladium. De deuteriumkernen (“deuteronen”) zouden vastgehouden worden in het metaalrooster van palladium, en in hun gevangenschap onder hoge druk met enige regelmaat in botsing komen, met de gewenste fusie als gevolg (afbeelding 3).



Afbeelding 2. Isotopen van waterstof.Waterstof heeft een “zware” en een “heel zware” broer. Protium is de naam voor “normaal” waterstof, waarbij de kern bestaat uit een enkel proton. Deuterium is waterstof met een extra neutron in de kern, en bij tritium heeft het proton gezelschap van twee neutronen. De kernen heten dan respectievelijk deuteron en triton. Watermoleculen waarbij waterstof van het type deuterium is, noemt men zwaar water. Afbeelding: Dirk Hünniger.

Hoewel er geen duidelijke theorie voorhanden was die suggereerde dat hun idee ook echt zou werken, zag het duo enkele opmerkelijke resultaten verschijnen. Tijdens de elektrolyse bleef het zwaar water op een constante temperatuur van ongeveer dertig graden, maar er waren opmerkelijke periodes van twee en soms meer dagen dat het water op mysterieuze wijze werd opgewarmd tot wel vijftig graden. Die grote bijkomende energie konden Fleischmann en Pons niet op een chemische of elektrische manier verklaren, dus waren ze overtuigd dat deze energieopbrengst het gevolg van de beoogde fusie was. Bovendien beweerden ze sporen van tritium en helium waargenomen te hebben: nieuwe atomen die nog niet in het water aanwezig waren vóór de start van het experiment.



Afbeelding 3. Fusie na elektrolyse.Er wordt in deze opstelling een stroom gestuurd van de anode door het zwaar water naar de kathode, die bestaat uit palladium. Fleischmann en Pons geloofden dat ze waterstofkernen van zwaar water via elektrolyse konden doen adsorberen in het metaalrooster van palladium. Op die manier zouden de waterstofkernen onder voldoende hoge druk komen te staan om fusiereacties te ondergaan, wat zich volgens de onderzoekers toonde in het opwarmen van het water. Afbeelding: Theresa Knott.

Een proces dat “gratis” water kan opwarmen zou natuurlijk ook gebruikt kunnen worden om op grote schaal bruikbare energie op te wekken, dus de faculteitshoofden van de Universiteit van Utah kregen algauw dollartekens in hun ogen. De beloftevolle bevindingen rond deze schijnbaar succesvolle koudefusiereactor werden halverwege maart 1989 op een persconferentie getoond aan een geestdriftige verzameling wetenschappers en journalisten, maar er zaten zeker nog een aantal experimentele haken en ogen aan hun revolutionair prototype. Bijvoorbeeld waren de heren chemici niet in staat geweest om gammastraling waar te nemen, die wel degelijk verwacht was bij de fusiereactie van deuteron, en kon het gevonden helium simpelweg verklaard worden als natuurlijke vervuiling van de lucht.

Herinneringen aan afgelopen energiecrises, het opkomend besef van antropogene

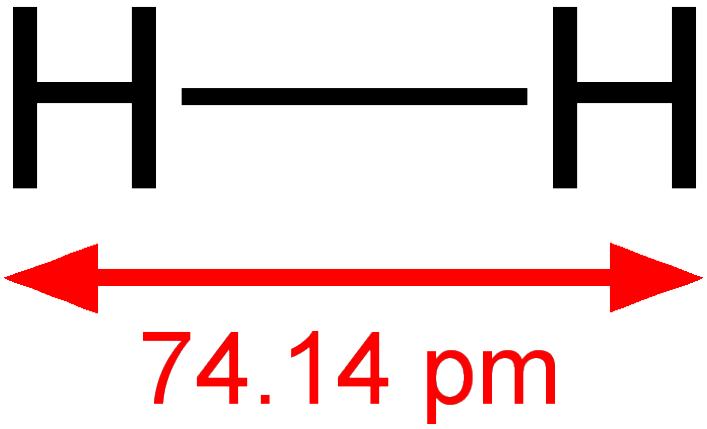
klimaatverandering, en een post-Tsjernobylhunkering naar veilige energie zorgden er gezamenlijk voor dat het experiment zich ondanks de dubieuze wetenschappelijkheid toch als een lopend vuurtje verspreidde. Tijdens de ijverige weken volgend op de bekendmaking werd het algauw duidelijk dat de vermeende koude fusie in feite een vorm van pathologische wetenschap was, aangezien in laboratoria over heel de wereld het sensationele resultaat niet gereproduceerd kon worden. Nog geen twee maanden na de persconferentie werd de “fusion confusion” als doodlopend pad bestempeld. Ondanks dit feit blijft het fenomeen voer voor de wetenschappelijke underground, en – wat dacht je anders – voor allerlei samenzweringstheorieën. Voor de zekerheid heeft een onderzoeksteam van Google het experiment recent toch nog eens herhaald, maar ook zij kondigden een jaar geleden aan dat ze het antwoord op het globale energieprobleem schuldig moesten blijven.

Koude fusie met behulp van muonen

Nochtans is koude fusie geen sciencefiction. In het jaar 1956 werd de term al gebruikt om een erg interessant proces te benoemen waarbij inderdaad waterstofkernen konden fuseren op kamertemperatuur. Het centrale probleem, de waterstofatomen voldoende dicht bij elkaar brengen, loste Nobelprijswinnaar Luis Alvarez op in wat nu bekend staat als “muongekatalyseerde fusie”. Geïnspireerd door het theoretisch werk van andere natuurkundige zwaargewichten Nikola Tesla en Yakov Zel’dovich, deed hij dat op een bijzonder creatieve manier.

Twee neutrale waterstofatomen zijn van nature graag samen in een covalente chemische verbinding die we kennen als diwaterstof of moleculair waterstof (afbeelding 4). In zulke verbindingen bevinden de kernen van de individuele waterstofatomen zich gemiddeld op een afstand van bijna 75 picometer. Dat klinkt als heel weinig, maar zoals je hierboven al las, is dat nog steeds honderdduizend keer te ver uiteen om te versmelten! Die afstand van 75 pm stemt ruwweg overeen met de diameter van een waterstofatoom, en dus met het dubbele van de gemiddelde afstand tussen de kern en het elektron dat rond die kern beweegt. Die afstand zou je dus veel en veel kleiner willen maken, maar dat staat de quantummechanica helaas niet toe. In plaats van tegen de fundamentele natuurwetten in te gaan, bedachten de wetenschappers zich dat ze die wetten juist konden *inschakelen* om hun doel te bereiken. Als ze het elektron van elk waterstofatoom op een bepaalde manier zwaarder konden maken, zou de quantummechanica immers eisen dat de baan van het verzwaarde elektron rond de

kern veel kleiner moest worden, en de kernen van de waterstofatomen veel dichter bijeen moesten komen.



Afbeelding 4. Moleculair waterstof.Een covalente binding van twee waterstofatomen, waarbij de elektronen van beide atomen “gedeeld” worden, veroorzaakt een gemiddelde afstand tussen de kernen van beide atomen van ongeveer 74 picometer. Die afstand zou beduidend kleiner gemaakt kunnen worden, als je de massa van de elektronen zou kunnen vergroten. Een muon, wat in essentie een massiever elektron is, kan die taak volbrengen, en kan de waterstofkernen voldoende dicht bij elkaar brengen om fusies te veroorzaken. Afbeelding: Afbeelding: Wikimedia.

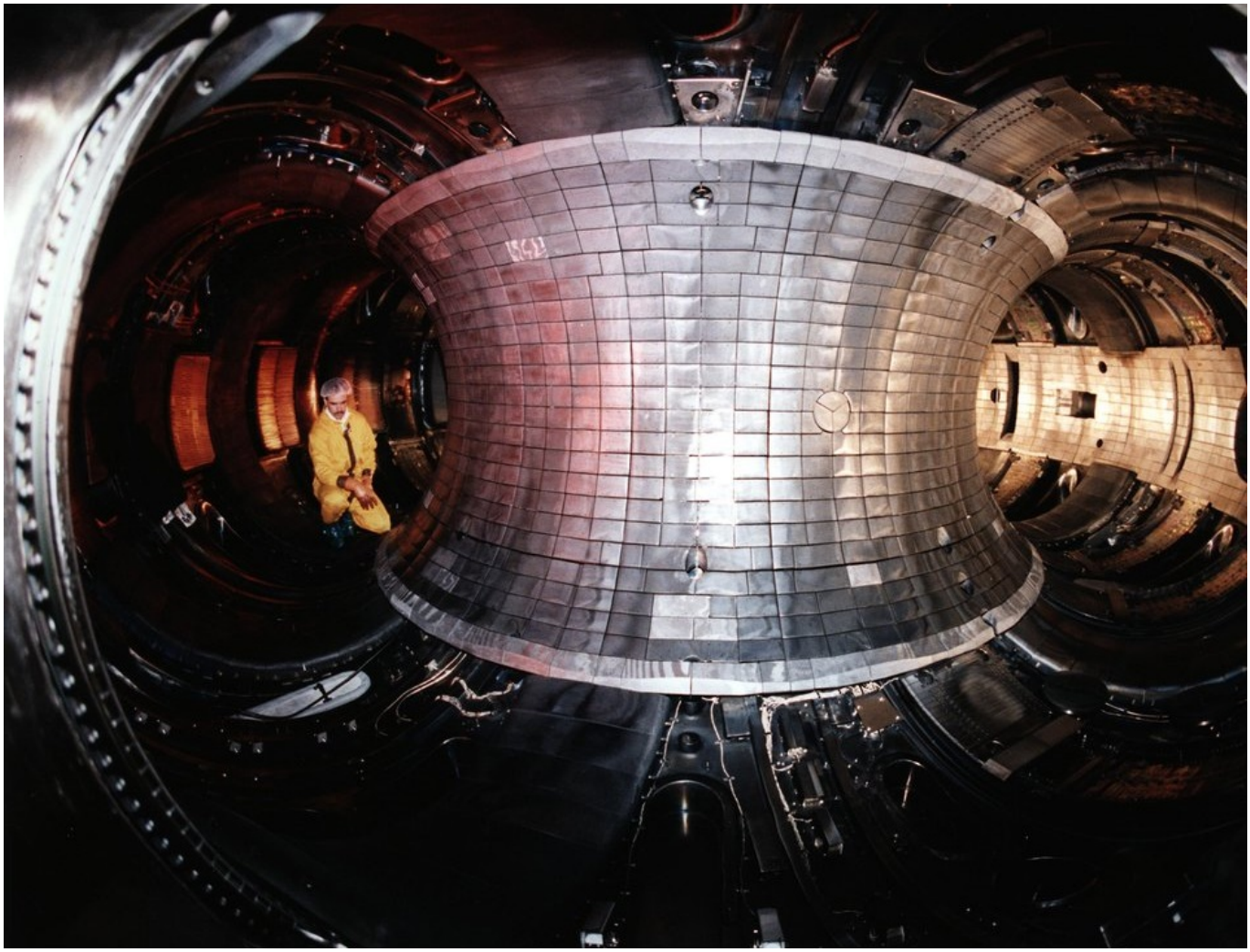
Aan iets zo klein als een elektron is het natuurlijk moeilijk gewichten hangen, maar deeltjesfysici hadden wel al een tijdje weet van een veel massiever broertje van het elektron: het muon. Dit fundamenteel deeltje heeft dezelfde lading als het elektron, maar een massa die wel 207 keer hoger is. Dit heeft zoals gezegd een direct quantummechanisch gevolg: een waterstofmolecule waarvan een van de atomen bestaat uit proton-plus-muon zal veel compacter zijn dan “gewoon” diwaterstof. De protonen bevinden zich in die configuratie 196 keer dichter bij elkaar! Dat is nog steeds lang niet voldoende om te “zoenen”, merk je terecht op, maar een ander quantummechanisch effect zorgt voor een natuurlijke willekeurige variatie in deze afstand. Het gebeurt dus geregeld spontaan dat de protonen veel dichter bij elkaar komen dan de gemiddelde afstand, soms zelfs zo dichtbij dat ze een fractie van een seconde in aanraking komen. Muonen hebben voor de fusie van de waterstofkernen dus een katalyserende werking, vandaar de naam “muongekatalyseerde fusie”.

Het ideale scenario om muongekatalyseerde fusie uit te buiten voor energieproductie stellen

we wat gesimplificeerd als volgt voor. Een hoeveelheid deuteronen en tritonen (de kernen van de “zwaardere” versies van waterstof) wordt geïnjecteerd met een hoeveelheid muonen, die samen een heel massieve en compacte vorm van positief geladen diwaterstof vormen. Binnen een paar picoseconden zal het triton met het deuteron fuseren tot een heliumkern en een vrij neutron, waarbij een relatief gezien gigantische energie vrijkomt. Het muon heeft dan zijn taak volbracht, en gaat naar het volgende duo toe om een nieuw compact molecuul te vormen, dat opnieuw binnen de kortste keren zal fuseren.

Alleen zal het helaas niet lukken om netto energiewinst te krijgen en onze batterijen op te laden, en dat om verschillende redenen. Ten eerste zijn muonen allesbehalve duurzaam, want het zijn geen stabiele deeltjes; na gemiddeld iets meer dan twee microseconden vervalt het muon in een elektron en verliest het dus zijn katalyserende kwaliteiten. Je moet voortdurend nieuwe muonen aanmaken en blijven injecteren, wat allerminst een energiezuinige manier van werken is. Ten tweede, en dat is zelfs nog een groter probleem, is er een reële kans dat de muonen na de fusie blijven hangen aan het pas ontstane heliumdeeltje, en dus geen andere fusies meer kunnen katalyseren. Zolang die problemen niet worden opgelost, zullen fusiereactoren geen commerciële concurrentie zijn voor bruinkoolcentrales.

Gelukkig wordt er wereldwijd onderzoek gedaan naar het oplossen van de bestaande problemen. Er zijn ruwweg drie categorieën van oplossingen. Óf we vinden een zuinigere manier om muonen aan te maken, óf we vinden een manier waarop muonen niet blijven plakken aan de heliumkern, óf we bemachtigen een formule waarmee vastgeplakte muonen weer losgemaakt kunnen worden. Heel veel concrete hoop om deze problemen op te lossen is er op dit moment niet, maar anderzijds dachten kernfysici in de beginjaren van hun vakdomein dat ook kernsplitsing op grote schaal nooit mogelijk zou zijn. Daar zijn ondertussen wel een aantal pijnlijke tegenvoorbeelden voor te vinden.



Afbeelding 5. Kernfusiereactor.Dit is de binnenkant van een fusiereactor van het type “tokamak”. Een plasma van meer dan honderd miljoen graden Celsius wordt in dit donutvormige apparaat in bedwang gehouden terwijl de kernen fusie ondergaan. De hoop is om dit soort reactoren in de toekomst energie-efficiënt te maken, om op die manier een ecologische en vrijwel onuitputbare bron van energie aan te boren. Afbeelding: US Dept. of Energy.

Ook het onderzoek naar gecontroleerde hete fusie gaat gestaag voort, al wordt daar ook plagerig over beweerd dat het permanent “voor binnen dertig jaar” is. Toch is ook dat onderzoek absoluut fascinerend, alleen al door hoe indrukwekkend een gemagnetiseerde plasmadonut eruitziet – dat is een verhaal voor een andere keer. (Afbeelding 5.) We dromen groot, maar een toekomst met schone, onschadelijke en virtueel onuitputtelijke energie is simpelweg te mooi om op te bergen.