

De fusiedroom



**JEAN-PAUL KEULEN**

# **De fusiedroom**

**FEITEN EN FABELS OVER  
EEN VEELBELOVENDE ENERGIEBRON**

New Scientist  
Pocket Science

## **Reeds verschenen in de serie Pocket Science**

*De quantumcomputer – een digitale revolutie op het punt van uitbreken*, George van Hal (juli 2017)

*Ruimtetijd – hoe Einstein het heelal een vierde dimensie gaf*, Yannick Fritschy (september 2017)

*Exoplaneten – de zoektocht naar nieuwe werelden*, Joris Janssen (januari 2018)

*Telescopen van de toekomst – de nieuwe grote ogen van de astronomie*, Govert Schilling (maart 2018)

*DNA-bewerking – knippen en plakken met CRISPR/Cas9*, Kristel Kleijer (september 2018)

*Sociale robotica – de onstuitbare opmars van menselijke machines*, Sebastiaan van de Water (november 2018)

*Het trillende universum – over snaartheorie, deeltjes en verborgen dimensies*, Martijn van Calmthout (maart 2019)

*Tossen met de kosmos – over entropie en de statistiek van het heelal*, George van Hal (mei 2019)

*De stam van het woord – over taalevolutie en de eerste taal ter wereld*, Yannick Fritschy (november 2019)

*Kweekvlees, fake vlees en pizza's uit de printer – over het voedsel van de toekomst*, Sebastiaan van de Water (maart 2020)

*R.I.P. heelal – over het einde van het universum*, Ans Hekkenberg (juni 2020)

*Grensverleggende getallen – over 0, 1, i,  $\infty$  en andere wiskundige grootheden*, Yannick Fritschy (november 2020)

## **Binnenkort verkrijgbaar in de serie Pocket Science**

*Stel, je bent een virus – hoe mazelen, corona en verwanten hun stempel op de wereld drukken*, Bart Braun (juni 2021)

Meer informatie: [pocketscience.nl](http://pocketscience.nl)

# Inhoud

Inleiding 7

**Deel 1. De droom 11**

1. De zon op aarde? 13

**Deel 2. De realiteit 33**

2. Drie wegen naar fusie 35

3. De vierde weg 49

4. ITER voorbij 63

**Deel 3. Alternatieve werkelijkheden 75**

5. Kleiner en sneller? 77

6. De koude kant 94

Nawoord 103

Dankwoord 105

Index 107

Meer lezen? 111



# Inleiding

Als je tegen iemand begint over kernfusie, zijn er een paar reacties mogelijk. Ten eerste een afdwalende blik – want laten we eerlijk zijn, er bestaan nu eenmaal mensen die niet geïnteresseerd zijn in nieuwe manieren om energie op te wekken, hoe interessant en uitdagend ook. Ten tweede zou het iemand kunnen zijn die het verschil niet kent tussen kernfusie en kernsplitsing, en die gelijk Tsjernobyl-achtige doemscenario's begint op te diepen.

Maar je kunt natuurlijk ook tegenover iemand staan die wél weet waar je het over hebt. Dan heb je kans dat je gesprekspartner fusie ziet als dé energiebron van de toekomst die alle andere overbodig maakt. Wind? Zon? Waarom daar nu geld en moeite in steken als we straks overal kernfusie-reactoren kunnen neerzetten? Of je staat juist tegenover een scepticus die het hele gesprek doodslaat door schamperend het grapje te maken dat 'fusie er altijd pas over vijftig jaar is'. Oftewel: nooit.

En dan zijn er nog de mensen die beweren dat het hele onderzoek naar kernfusie op een verkeerd spoor zit. Is immers niet tientallen jaren geleden al aangetoond dat koude kernfusie óók een optie is? Maar nee, dáár wil de gevestigde orde niet aan; die bouwt liever aan miljarden kostende appa-

raten waarin temperaturen van meer dan 100 miljoen graden Celsius opgewekt worden. Want, ja, daar hebben ze nou eenmaal geld voor weten los te peuteren, en wie is er nu zo gek om al die miljarden terug te geven, simpelweg omdat iemand anders een beter idee had?

Ik chargeer, maar: al deze mensen zitten er tot op zekere hoogte naast. Sowieso is kernfusie een compleet ander proces dan kernsplitsing. Bij fusie is een meltdown simpelweg niet mogelijk en vormt radioactief afval nauwelijks een probleem. Toch is fusie niet dé oplossing voor al onze energieproblemen. Maar je doet dit onderzoeksveld ook weer tekort als je het op voorhand afschrijft. Ja, er zijn in het verre en recente verleden grootse beloftes gedaan die wetenschappers niet hebben kunnen nakomen. En ja, het grote fusieparadepaardje, ITER, heeft te maken gehad met flink wat vertragingen en budgetoverschrijdingen. Maar inmiddels is de bouw van deze internationale reactor behoorlijk op stoom gekomen en wordt er ook op een aantal andere plekken gewerkt aan reactoren waar kansrijke concepten achter schuilgaan. (En, toegegeven, aan de nodige reactoren waar dat niet voor geldt.)

Garanties zijn er natuurlijk nog steeds niet. Het kan best zo zijn dat alle paden die op dit moment worden bewandeld ergens doodlopen. Dat het, alle pogingen ten spijt, niet lukt om linksom of rechtsom een goed presterende én economisch levensvatbare fusiereactor af te leveren. En ook als zo'n reactor er uiteindelijk wél komt, zullen we flink wat geduld nodig hebben.

Maar wat maakt het zo moeilijk om fusie te laten lukken, oftewel: atomen samen te smelten en daar energie uit te halen? Wat wordt er gedaan om dat toch voor elkaar te krijgen? Welke reactorconcepten klinken veelbelovend en welke *not so much*? En wat is, uiteindelijk, de toekomst waar



we op mogen hopen als deze vorm van energieopwekking ooit echt van de grond komt? Over die vragen gaat *De fusiedroom*.



# 1

## De zon op aarde?

Zonder zon geen leven. Sowieso zorgt de hitte van de ster waar de aarde omheen cirkelt ervoor dat we hier vloeibaar water hebben – de perfecte omgeving voor het ontstaan van de microscopische organismen die uiteindelijk zouden leiden tot planten, dieren en mensen. Bovendien voorziet de zon ons continu van warmte en energie. Zou hij er plotsklaps mee ophouden, dan was het ook snel met ons gedaan.

Maar de zon houdt er niet plotsklaps mee op. Per seconde wekt hij 400 quadriljoen (400 miljoen miljard miljard) joule aan energie op; genoeg om de hele wereldbevolking honderdduizenden jaren van energie te voorzien. En het heeft er alle schijn van dat ie dat al heel lang doet en daar ook nog heel lang mee door zal gaan.

De grote vraag is dan: waar haalt de zon al die energie vandaan? Daarmee zaten negentiende-eeuwse wetenschappers nogal in hun maag. Is het misschien één grote bal brandende steenkool? Tijdens de door deze brandstof aangejaagde industriële revolutie leek dat vast een logische gedachte, maar nee, zo schreef het tijdschrift *Scientific American* in 1863: dat kon de oplossing niet zijn. Een steenkoolzon zou na zo'n vijfduizend jaar op zijn. En, zo was

destijds ook al wel duidelijk: in zo'n korte periode kreeg je de hele geschiedenis van de aarde niet gepropt.

De gerespecteerde Britse wetenschapper William Thomson, alias Lord Kelvin, kwam in 1862 met een variant op die theorie. Volgens hem was de zon een compacte klont meteorieten, die continu met elkaar botsten en zo warmte opwekten. Op die manier, zo becijferde de Lord, zou de zon wel zo'n 20 tot 100 miljoen jaar kunnen 'branden'.

Dat strookte alleen niet met wat een andere, anno nu nóg beroemdere wetenschapper zei: Charles Darwin. Die had in zijn klassieker *De oorsprong der soorten* becijferd dat het zo'n 300 miljoen jaar moest hebben gekost om de Wealdvallei in Engeland te laten ontstaan. Onzin, vond Kelvin. Noch de aarde, noch de zon hadden daar lang genoeg voor bestaan. En dus was er ook niet genoeg tijd beschikbaar voor de trage evolutieprocessen die Darwin voor zich zag.

Inmiddels weten we dat Darwin het bij het rechte eind had en Kelvin ernaast zat: aarde en zon bestaan al 4,6 miljard jaar, meer dan lang genoeg om de Wealdvallei in het Britse landschap uit te slijten én om te evolueren van een eencellige tot een Engelse Lord. Maar welke truc gebruikt de zon dan, om zo lang te kunnen blijven bestaan? Welke processen spelen zich af in het binnenste van deze ster? En kunnen we die hier op aarde op de een of andere manier kopiëren?

## **Het visioen van Eddington**

Om te kunnen snappen hoe de zon aan zijn energie komt, moet je eerst weten hoe materie op kleine schaal in elkaar steekt. In de tijd van Kelvin en Darwin zetten wetenschappers al belangrijke stappen in de richting van een verklaring. Er is een beperkt aantal scheikundige elementen, zo stelde de Britse wetenschapper John Dalton vast, waar alles om ons

heen uit is opgebouwd: waterstof, koolstof, zuurstof... De Rus Dmitri Mendelejev bracht vervolgens alle bekende elementen onder in een enorme tabel: het periodiek systeem, dat prijkt aan de muur van zo goed als elk scheikundelokaal. Gaatjes in die tabel werden vervolgens gevuld met nieuw ontdekte elementen. Inmiddels kennen we er 118. De eerste 92 komen in de natuur voor, de rest moet in het lab gemaakt worden.<sup>1</sup>

Een volgende stap vormde de ontdekking van radioactiviteit, eind negentiende en begin twintigste eeuw. Bepaalde zware atomen, zoals uranium, bleken zomaar, uit zichzelf, te kunnen veranderen in lichtere exemplaren, en daarbij energie te produceren. Was dat misschien wat er in de zon gebeurde? Nou, nee. De zon bleek niet uit uranium te bestaan, maar voornamelijk te zijn gemaakt van waterstof, het lichtste element in het heelal. Een radioactieve zon was dus ook niet de oplossing.

In 1920 constateerde de Britse natuur- en scheikundige Francis Ashton echter iets gekks. Een heliumkern bleek een iets kleinere massa te hebben dan de massa's van de bestanddelen bij elkaar opgeteld. Het geheel bleek voor een keer minder dan de som der delen. Ashtons landgenoot Arthur Eddington, een vooraanstaand astrofysicus, trok daar bizar snel een vergaande conclusie uit. Stel nu, stelde hij datzelfde jaar nog, dat de zon waterstofkernen samenvoegt tot heliumkernen. En dat het verschil in massa tussen vóór en na vrijkomt in de vorm van energie. Dat zou voldoende moeten zijn om de zon vele miljarden jaren te laten bestaan. En, zo vervolgde Eddington met vooruitziende blik: misschien zou

1 Van element nummer 94, plutonium, is ook een heel klein beetje te vinden in de natuur; in uraniumerts. Maar het plutonium dat gebruikt wordt in kerncentrales moeten we maken.

de mensheid kunnen leren die energie in te zetten om zichzelf vooruit te helpen – of zichzelf te vernietigen.

Daarmee schoot Eddington glansrijk in de roos. Waterstof samensmelten tot helium is precies wat de zon doet, al 4,6 miljard jaar lang – en dat zal ie nog ongeveer even lang blijven doen. Hoe dat proces een rol kon spelen in vernietigende wapens wist de mensheid ook vrij snel uit te vogelen. In 1942, toen er nog niet eens ‘normale’ atombommen waren – die werken met kernsplitsing – begonnen natuurkundigen al serieus te fantaseren over een fusiebom. Nog geen tien jaar later vonden de eerste tests met zulke bommen plaats. Fusie inzetten ten bate van de mensheid is ons echter, ruim honderd jaar na Eddingtons ingeving, nog steeds niet gelukt.

### **Dromen versus de werkelijkheid**

Toch klinkt het trucje van de zon in de basis vrij eenvoudig. Neem wat waterstofkernen, plak die aan elkaar en je hebt een heliumkern én energie. Extra mooi is dat waterstof niet bepaald zeldzaam is. Wat heet: 75 procent van het heelal bestaat eruit. Bovendien haalt de zon uit een klein beetje waterstof bizar veel energie. Voor de hoeveelheid joules die de zon produceert uit een enkele gram van het spul, moeten wij aardbewoners 8 ton aardolie verbranden.

Dan is het verleidelijk om met Eddington aan het dromen te slaan. Stel dat we straks hier op aarde kunnen wat de zon kan. Dat we energiecentrales kunnen bouwen die elektriciteit opwekken door de simpelste, meestvoorkomende atoomkernen die er maar zijn samen te voegen. Dan kunnen we wat er nog over is aan fossiele brandstoffen wel in de bodem laten zitten. Ook hoeven we niet meer in de weer met windturbines en zonnepanelen, die alleen energie opwekken als het waait of er zonlicht op valt – energie die we dus zullen

moeten leren opslaan, willen we er op elk gewenst moment gebruik van kunnen maken.

Conventionele kerncentrales, waarin atomen niet smelten maar gesplitst worden om energie op te wekken, kunnen we in dat droomscenario eveneens vaarwel zeggen. Want hoewel die de laatste jaren weer wat salonfähiger zijn geworden, kampen ze nog steeds met een aantal nadelen. Ten eerste hebben ze het zware element uranium nodig als brandstof, dat vele malen zeldzamer is dan waterstof. Niet dat we binnen afzienbare tijd door ons uranium heen zullen zijn, maar het spul is nou ook weer niet in elke achtertuin op te graven. Ten tweede leveren kernsplittingscentrales afval op dat duizenden jaren radioactief blijft. Dat moet je dus ergens opslaan, op zo'n manier dat het al die tijd niemand kwaad kan doen. En ten derde bestaat er de kans dat zulke centrales te maken krijgen met een kernramp zoals die van Tsjernobyl in 1986 of Fukushima in 2011, waarbij grote hoeveelheden radioactief materiaal kunnen vrijkomen. Dat laatste kan bij een kernfusiereactor simpelweg niet gebeuren.

Bouwen dus, die dingen, zou je zeggen. Helaas blijkt de werkelijkheid weerbarstiger. Nergens ter wereld levert momenteel een kernfusiecentrale stroom aan het net, en dat zal ook nog wel een paar decennia zo blijven. Wat maakt fusie dan zo lastig? Wat gebeurt er om deze vorm van energieopwekking toch te realiseren? En wat kunnen we dan, uiteindelijk, van kernfusie verwachten? Zijn de voordelen ten opzichte van andere energiebronnen echt zo groot dat alle concurrenten het museum in kunnen?

## **Elektronen, protonen en neutronen**

Laten we eerst eens in wat meer detail bekijken wat er precies gebeurt in de zon – en waarom dat op aarde geen haalbare





## 2

# Drie wegen naar fusie

Binnen de kortste keren zou de wereld op kernfusie gaan draaien, zo leek het in 1951. Althans, als je de Argentijnse president Juan Perón geloofde. Die maakte namelijk op een persconferentie bekend dat er in zijn land een ‘totaal nieuwe manier was gevonden om atoomenergie op te wekken’; dat in een lab ‘kunstmatige zonnen op aarde’ waren gecreëerd.

Verantwoordelijk voor die krachttoer was de in Oostenrijk-Hongarije geboren natuurwetenschapper Ronald Richter. Die had een apparaat gebouwd waarin, onder invloed van geluidsgolven en elektrische vonken, deuteriumkernen zouden fuseren met kernen van het derde element uit het periodiek systeem: lithium. Die reacties zouden dan plaatsvinden bij een temperatuur van zo’n 6000 graden Celsius, zo vertelde Richter een paar dagen na de persconferentie.

De rest van de wereld reageerde nogal sceptisch. 6000 graden lijkt misschien heet, maar in het binnenste van de zon is de temperatuur zo’n 15 miljoen graden. En onder aardse omstandigheden, waar de dichtheid veel lager is dan in het hart van de zon, heb je nóg veel hogere temperaturen nodig, wil een deel van je atoomkernen fusiereacties aangaan. Bij deuterium en tritium, zoals we hebben gezien de meest veelbelovende fusiebrandstof, heb je het bijvoorbeeld

over zo'n 150 miljoen graden Celsius. Voor andere brandstoffen ligt die temperatuur nog veel hoger.

Toch werd Richters claim niet overal zomaar weggewuifd. Een Franse wetenschapper maakte bekend dat hij eerder ook al zoiets voor elkaar had gekregen in zijn eigen lab. En de Nederlandse Prins Bernhard, die in Argentinië was toen Perón zijn aankondiging deed, bood de president gelijk een samenwerking aan. Als er inderdaad een manier was bedacht om energie op te wekken zonder dat er olie of gas voor verbrand hoefde te worden, wilde ons land daar maar al te graag van meeprofiteren.

Een marinevlieger die het Argentijnse lab bezocht, gelegen op een eilandje, kwam echter terug met een nogal... apart verhaal, zo schrijft journalist Charles Seife in het boek *Sun in a Bottle*. Richter had een 'demonstratie' van zijn kunnen gegeven door een vat met stikstof en waterstof te laten exploderen. De ontploffing blies een deur uit zijn sponningen. Daarop spuwde een naburig apparaat een papiertje uit, waar de wetenschapper het woord 'atoomenergie' op krabbelde. Niet helemaal het proces wat Perón had geschetst, dus.

Bij een volgende demonstratie, aan een team van wetenschappers, ging het er wat minder bizar aan toe – maar het resultaat was niet veel hoopgevender. Richter had allemaal geigertellers geïnstalleerd die luid tikten; een teken dat er in elk geval iets radioactiefs in het lab gebeurde. Diezelfde geigertellers bleven echter stil toen de onderzoekers er radioactief materiaal bij hielden. Bovendien maten de onafhankelijke wetenschappers geen gammastraling, terwijl je die óók zou verwachten als daadwerkelijk gebeurde wat Richter had geclaimd. Al gauw was duidelijk: Perón had zich laten inpakken door ofwel een verwarde geest, ofwel een oplichter, en had honderden miljoenen gestoken in een project dat nooit iets had kunnen opleveren.

Hoewel het Richterverhaal een eerste duistere wolk wierp over de fusiedroom, had die wolk wel een zilveren randje. Toen de Amerikaanse natuurkundige Lyman Spitzer net voordat hij op wintersportvakantie ging hoorde wat de Argentijnen beweerden, dacht hij net als veel van zijn vakgenoten meteen: ‘Dat kan niet werken.’ In de skilift begon hij vervolgens zelf na te denken over hoe je dan wél een fusie-reactor zou kunnen bouwen. En de gedachten die Spitzer daar had, bungelend boven de sneeuw, zouden de aanzet vormen tot een reactorontwerp waar tot op de dag van vandaag mee wordt geëxperimenteerd.

### **Opgesloten door magneten**

Waar het bij fusie in eerste instantie om gaat, is dit: je werkt met een plasma, oftewel een gas van losse atoomkernen en elektronen, dat heet genoeg moet zijn om er fusiereacties in te laten plaatsvinden. Hoe houd je dat op zijn plek?

De zon heeft dat probleem niet. Die is zo zwaar dat zijn eigen zwaartekracht volstaat om het plasma in zijn binnenste samen te persen. Bij kernfusie hier op aarde is zo’n enorme, naar binnen gerichte druk er echter niet. Wij zullen dus een andere manier moeten vinden om een heet plasma – dat, zoals alle hete dingen, niets liever wil dan uitdijen – op te sluiten.

Een eerste gedachte is dan misschien: als je iets wilt opsluiten, moet je het in een doos stoppen. Maar bij een plasma waarin kernfusie moet gaan plaatsvinden, werkt dat niet. Volgens veel populairwetenschappelijke teksten over kernfusie komt dat doordat we geen materiaal hebben dat bestand is tegen een plasma van 150 miljoen graden – maar die extreem hoge temperatuur is voor de doos niet zo’n groot probleem als je misschien zou denken.