FUSIE: Fysica van een fundamentele energiebron

Fusiereacties voorzien al jarenlang onze zon en alle andere sterren van energie. Om aanzienlijke hoeveelheden energie uit fusiereacties op te wekken zijn plasma's vereist op zeer hoge temperatuur die voldoende lang stabiel opgesloten moeten blijven, zodat voldoende fusiereacties kunnen plaatsvinden. Onderzoeksresultaten uit kern- en plasmafysica vormen de basis voor de realisatie van beheerste kernfusie op aarde. Op lange termijn zou deze potentiële energiebron er toe kunnen bijdragen om samen met overige energiebronnen in de wereldenergiebehoeften te voorzien. Met de zon en de aarde als visuele achtergrond wil deze poster de kernfusie verduidelijken — het verband met andere energiebronnen, de fysica van fusiereacties, de verhitting en de beheerste kernfusie.

Energievormen en -conversie

Onze moderne maatschappij is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van vele verschillende energiebronnen en hun omzetting in bruikbare energievormen. In de meeste krachtcentrales wordt in een eerste stap warmte opgewekt. Dit gebeurt door chemische reacties (verbranding), kernsplijting en — in de toekomst — kernfusie. De opgewekte warmte wordt daarna omgezet in andere, meer bruikbare energievormen via processen die onderworpen zijn aan de basiswetten van de thermodynamica. De tweede hoofdwet van de thermodynamica leert dat er grenzen zijn aan de efficiëntie van dergelijke processen; verliezen en afvalstoffen zijn onvermijdelijke gevolgen van elke conversie. De energie die met één kilogram brandstof kan worden vrijgemaakt is duidelijk hoger voor nucleaire reacties dan voor chemische, zoals aangegeven in deze poster. In de eerste fusiecentrale zal waarschijnlijk deuterium — rijkelijk voorhanden in de oceanen — met tritium worden versmolten. Tritium zal geproduceerd worden in de reactor zelf, uitgaande van lithium, dat in tritium en helium uiteenvalt na absorptie van de neutronen die vrijkomen bij de D-T reactie. De eigenlijke grondstoffen voor een toekomstige kernfusiereactor zijn daarom deuterium en lithium.

Zo werkt kernfusie

De vergelijking $\Delta E = (m_b - m_e)c^2$ leert dat het verschil in massa tussen begin- en eindproducten van een reactie, (m_b) resp. (m_e) omgezet wordt in kinetische energie ΔE. De bindingsenergie van een kern resulteert uit het verschil tussen de massa van de samengestelde kern en de som van de massa's van de samenstellende (vrije) kerndeeltjes (neutronen en protonen); een grotere bindingsenergie betekent een groter verschil in massa. De curve die de bindingsenergie per kerndeeltje weergeeft als functie van de atoommassa toont dat uit de fusie van kernen met kleine massa een kern met een grotere bindingsenergie ontstaat, waardoor energie vrijkomt. De splijting van kernen met een grotere massa (met een atoommassa van meer dan 62) leidt tot brokstukken met een totale massa die kleiner is dan die van de oorspronkelijke kern en heeft eveneens het vrijkomen van energie tot gevolg. Omdat de curve van de bindingsenergie duidelijk steiler is aan de "fusiekant" dan aan de "splijtingskant" komt er bij kernfusie per kerndeeltje meer energie vrij dan bij kernsplijting. Twee belangrijke kernfusieprocessen zijn schematisch weergegeven: de proton-proton (p-p) cyclus, die bijna volledig voor de energieproductie in de zon verantwoordelijk is, en de D-T reactie, de meest waarschijnlijke kandidaat voor de eerste generatie fusiecentrales. De reactiesnelheid voor fusiereacties is zeer sterk afhankelijk van de energie, d.w.z. van de ionentemperatuur van de deelnemende kernen. Hoge temperaturen zijn nodig voor kernfusie omdat de kernen elkaar moeten naderen tot op 10^{-15} m vooraleer te kunnen versmelten. Op deze kleine afstand overwinnen de aantrekkende sterke kernkrachten de elektrostatische afstoting. Het enorme verschil in reactiesnelheid tussen de twee fusieprocessen verklaart waarom eerder aan de D-T reactie dan aan de p-p cyclus uit de zon de voorkeur wordt gegeven voor toepassingen op aarde.

Plasma - de vierde aggregatietoestand

Een plasma is een verzameling van vrij bewegende geladen deeltjes. Plasma's komen voor in diverse omstandigheden, met zeer grote verschillen in deeltjesdichtheden en temperaturen. De plasmafysica en -technologie zijn de sleutel tot een beter begrip van de zon, de sterren, de interstellaire ruimte, melkwegstelsels, neonverlichting, de bliksem, het noorderlicht en de technieken voor de beheersing van het fusieproces op aarde. De elektronen en ionen in het plasma ondervinden de invloed van elektrische en magnetische velden, opgewekt door stromen aangelegd in of buiten het plasma. De dynamica van deze systemen is complex en een goed begrip hiervan is een noodzakelijke voorwaarde voor de realisatie van energieproductie uit kernfusie op aarde.

Voorwaarden voor fusie

Voor de realisatie van beheerste kernfusie op aarde is een verdere verfijning van de reeds bestaande technieken voor de verhitting en de opsluiting van een plasma vereist. Er bestaan twee veelbelovende technieken voor het opsluiten van een deuterium-tritium plasma: opsluiting door magneetvelden ("magnetische fusie") en opsluiting door de mechanische traagheid of inertie van de brandstof ("inertiële fusie"). In beide gevallen zijn plasmatemperaturen nodig van ongeveer 100 miljoen K. Voor de magnetische fusie is de tokamak — een hol torusvormig vat waarin een magneetveld wordt aangelegd — de configuratie die het meest intensief wordt onderzocht. Bij de inertiële fusie comprimeren en verhitten zeer krachtige laserstralen of ionenbundels een minuscuul bolletje ("pellet"), bestaande uit bevroren deuterium en tritium, tot dichtheden en temperaturen die relevant zijn voor fusie. In de korte tijd vóór het uiteenspatten van het geïmplodeerde bolletje, moeten voldoende fusiereacties plaatsvinden: fusie treedt op dank zij de traagheid van de versmeltende deeltjes.

Beheerste kernfusie is slechts mogelijk als het plasma op hoge temperatuur voldoende lang kan worden opgesloten bij voldoend hoge deeltjesdichtheden. Deze voorwaarde wordt uitgedrukt in termen van de "opsluitingskwaliteit": het product van de plasmadichtheid en de energieopsluitingstijd. In de meest geavanceerde experimenten werden plasma's gerealiseerd waarin voor de opsluitingstijd, de plasmadichtheid of de plasmatemperatuur afzonderlijk waarden werden bereikt welke zeer dicht de waarden benaderen die nodig zijn voor een zelfonderhoudende fusiereactie of die zelfs overschrijden. Maar men is er tot nu toe nog niet in geslaagd deze drie condities tegelijkertijd te verwezenlijken.

Actuele informatie en educatief materiaal over het onderzoek naar beheerste kernfusie in het World Wide Web

Fusion Education Project Home Page:	**http://FusEdWeb.pppl.gov/CPEP/Chart.html**
CPEP Home Page:	**http://pdg.lbl.gov/cpep.html**
CPEP Product Information:	**http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep_how_to_order.html**

TEC-Homepages

FZJ/IPP:	http://www.fz-juelich.de/ipp/
KMS-ERM Brussel:	http://fusion.rma.ac.be/
FOM Rijnhuizen:	http://www.rijnh.nl/

Deze pagina's verwijzen verder naar andere instituten en organisaties die actief zijn op het gebied van de beheerste kernfusie.

Het **"Contemporary Physics Education Project" (CPEP)** is een vereniging zonder winstoogmerk van leraren, docenten en fysici. Het educatief materiaal van CPEP belicht de actuele inzichten in de wetenschappen, met inachtname van de belangrijkste wetenschappelijke ontdekkingen van de laatste 30 jaar. CPEP sponsort ook vele workshops voor leraren. Voor meer informatie omtrent CPEP kan men terecht op het e-mail adres `pdg@lbl.gov` of via het World Wide Web (zie boven). CPEP breidt zijn aanbod voortdurend uit. CPEP materiaal kan besteld worden bij **Science Kit,** 777 East Park Drive, Tonawanda, NY 14150 USA,Tel +1-800-828-7777, Fax +1-716-874-9572.

Het **"Trilateral Euregio Cluster" (TEC)** is een constellatie bestaande uit nationale onderzoeksinstituten in België, Nederland en Duitsland, met name het Laboratoire de Physique des Plasmas-Laboratorium voor Plasmafysica van de Koninklijke Militaire School-Ecole Royale Militaire te Brussel, het FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen te Nieuwegein en het Institut für Plasmaphysik van het Forschungszentrum Jülich. Bijkomende exemplaren van deze poster (in het Nederlands, Frans, Duits, Italiaans, Spaans en Portugees) kunnen worden aangevraagd bij het **Institut für Plasmaphysik**, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Fax +49-2461-615452.