Fusie

Fysica van een Fundamentele Energiebron

Fusie-reacties voorzien de zon en de sterren van energie. In kernfusiereacties versmelten lichte kernen tot zwaardere. Bij dit fusieproces wordt massa (m) omgezet in kinetische energie (E) volgens Einstein's formule $E=mc^2$. Een opeenvolging van verschillende reacties, de "Proton-Proton-Cyclus" genaamd, voorziet de zon voor het grootste deel van energie en dit zal zo nog miljarden jaren doorgaan. Bij deze reactie worden protonen, de kernen van waterstof, omgezet in alfadeeltjes, de kernen van heliumatomen.

Om Fusie op aarde te verwezenlijken moeten atomen tot zeer hoge temperaturen worden verhit (typisch boven 10 miljoen K). Bij deze temperaturen zijn de atomen geïoniseerd en vormen een plasma. Om een netto energiewinst te boeken, moet het plasma gedurende een voldoend lange tijd opgesloten blijven zodat voldoende fusiereacties zouden kunnen plaatsvinden. Als fusiereactoren werkelijkheid worden, beschikken we over een praktisch onuitputtelijke energiebron, gezien de brandstoffen (zoals deuterium) in grote hoeveelheden op aarde aanwezig zijn. De vooruitgang in de laatste jaren op weg naar dit uiteindelijke streefdoel is aanzienlijk.

ENERGIEBRONNEN EN -CONVERSIES

EEN OVERZICHT VAN ENERGIEOMZETTINGSPROCESSEN

Energie kan onder vele vormen voorkomen en via verschillende processen kan de ene vorm in de andere worden omgezet. Alhoewel de totale energie behouden blijft, vermindert bij de meeste omzettingsprocessen de hoeveelheid bruikbare energie.

Energiebron	Omzetting	Bruikbare Energie
Chemisch, Gravitationeel, Nucleair, Zon, Wind, enz...	Bruikbare $E_{uit} = \eta\ E_{in}$ η = thermodynamische efficiëntie; typisch tussen 10 en 40%.	mechanisch elektrisch thermisch Afval-stoffen Onbenutte Energie

Fysische parameters voor exotherme reacties

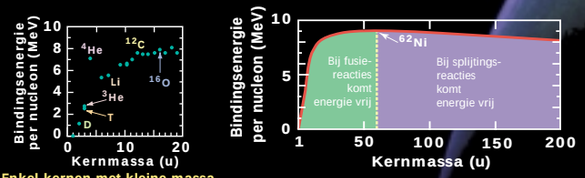
Type reactie:	chemisch	kernsplijting	kernfusie
Voorbeeld	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	${}^1n + {}^{235}U \Rightarrow {}^{143}Ba + {}^{91}Kr + 2\,{}^1n$	$D\ ({}^2H) + T\ ({}^3H) \Rightarrow {}^4He + {}^1n$
Typische Grondstoffen	Kolen, Olie en Lucht	UO_2 (3% ^{235}U + 97% ^{238}U)	Deuterium en Lithium
Typ. Temperatuur (K)	1000	1000	100 000 000
Energie die vrijkomt per kg brandstof (J/kg)	$3{,}3 \times 10^7$	$2{,}1 \times 10^{12}$	$3{,}4 \times 10^{14}$

ZO WERKT KERNFUSIE

KERNFYSICA VAN HET FUSIEPROCES

Bij de versmelting van kernen met kleine massa komt energie vrij, net als bij de splijting van kernen met grote massa.

Bindingsenergie per nucleon als functie van de kernmassa



Enkel kernen met kleine massa

Energie die vrijkomt bij kernreacties : $\Delta E = k\ (m_b - m_e)\ c^2$

Afgeleid uit Einstein's formule $E = mc^2$. ΔE = vrijgekomen energie per reactie; m_b = som van de afzonderlijke massa's voor reactie; m_e = som van de afzonderlijke massa's van de reactieproducten. In SI-eenheden bedraagt de omrekeningsfactor k=1; hij bedraagt 931,466 MeV/uc^2, wanneer E in MeV en m in atomaire massaeenheden (u) uitgedrukt wordt.

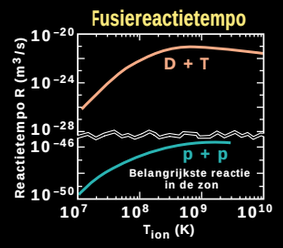
Enkele Kernmassa's

(De massa van het electron bedraagt 0,000549 u.)

Symbool	Deeltje	Massa(u*)
n (${}^1n$)	Neutron	1,008665
p (${}^1H$)	Proton	1,007276
D (${}^2H$)	Deuteron	2,013553
T (${}^3H$)	Triton	3,015500
${}^3He$	Helium-3	3,014932
α (${}^4He$)	Helium-4	4,001506

* 1 u = 1,66054 x 10^{-27} kg = 931,466 MeV/c^2

Fusiereactietempo



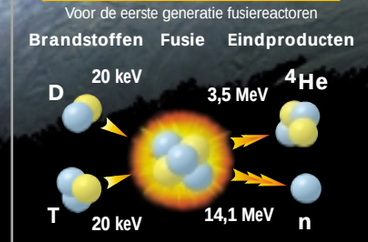
Aantal fusiereacties per volume- en tijdseenheid = $R\ n_1 n_2$

n_1, n_2 = dichtheid van de reagerende deeltjes (ionen/m^3); R = reactietempo (m^3/s). Vermenigvuldigd met ΔE verkrijgt men de vermogensdichtheid van het fusieproces.

TWEE BELANGRIJKE FUSIEPROCESSEN

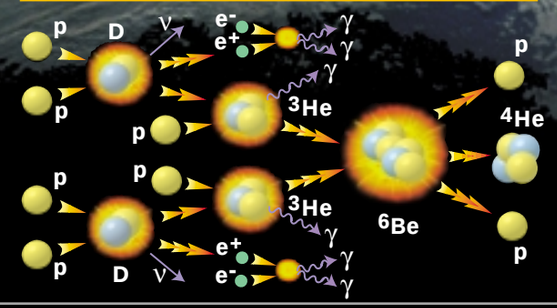
$D + T \Rightarrow {}^4He + {}^1n$

Voor de eerste generatie fusiereactoren



1 eV = 1,6022 x 10^{-19} J. De gemiddelde kinetische energie van een deeltje is 1 eV bij een temperatuur van 11 600 K.

"p-p"- cyclus : REACTIESCHEMA IN DE ZON



REALISATIE VAN DE VOORWAARDEN VOOR FUSIE

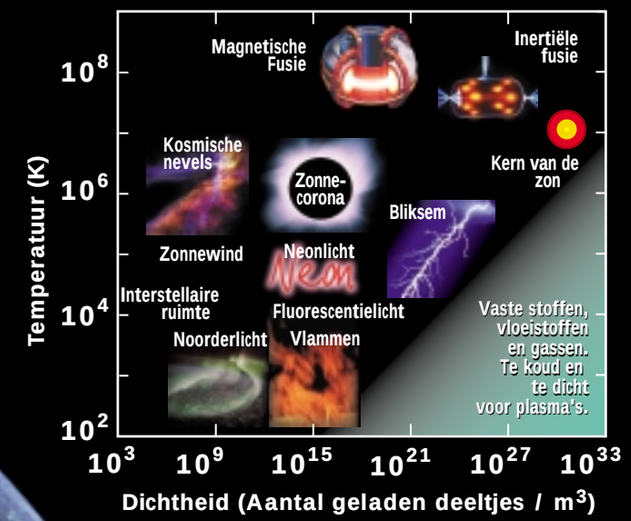
PLASMAVERHITTING EN -OPSLUITING

	Zwaartekracht	Magneetvelden	Traagheid der materie
Opsluiting: Aanzienlijke hoeveelheden energie vrijmaken door middel van fusie vereist het voldoende lang opsluiten van een heet plasma met hoge dichtheid.	Plasma van sterren die geboren worden	Tokamak	Laserfusie
Typische Afmetingen:	<--------- Grootte: 10^{19} m ---------> Levensduur van het plasma: 10^{15} - 10^{18} s	<---------- Grootte: 10 m ----------> Levensduur van het plasma: 10^{-2} - 10^{6} s	<------ Grootte: 10^{-1} m ------>
Verhittings-mechanismen:	• Compressie • Energie uit fusiereacties	• Elektromagnetische golven • Joule verhitting (elektrische stroom) • Inschieten van bundels neutrale deeltjes (Waterstofbundels) • Compressie • Energie uit fusiereacties	• Compressie (implosie door directe beschieting met laserstralen of ionenbundels, of door indirecte bestraling met X-stralen opgewekt met zulke bundels) • Energie uit fusiereacties

PLASMA – DE VIERDE AGGREGATIETOESTAND

EIGENSCHAPPEN VAN TYPISCHE PLASMA'S

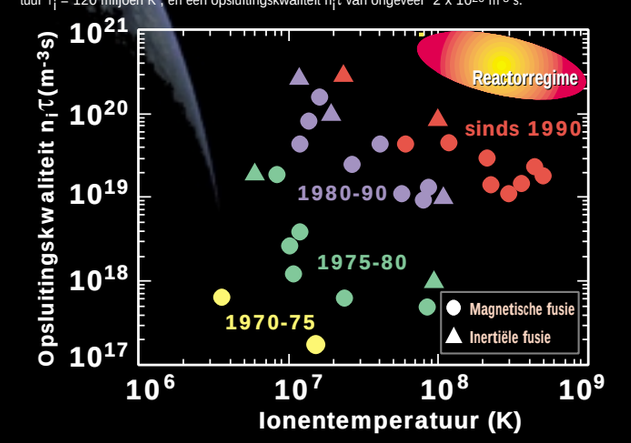
Een plasma bestaat uit vrij bewegende geladen deeltjes: elektronen en ionen. Omdat een plasma over unieke eigenschappen beschikt, die duidelijk verschillen van die van een vaste stof, vloeistof of gas, spreekt men van de vierde aggregatietoestand. Deze aggregatietoestand treedt op als de temperatuur voldoende hoog is om elektronen te scheiden van de positieve atoomkern. Plasma's komen voor met erg verschillende dichtheden en temperaturen.



FUSIE MOGELIJK MAKEN

EXPERIMENTELE RESULTATEN UIT HET FUSIEONDERZOEK

Het onderzoek naar magnetische zowel als inertiële fusie stellen zich beide als doel het verwerven van een beter inzicht in de opsluiting en verhitting van een plasma. Dit onderzoek heeft geleid tot hogere ionentemperaturen T_i, ionendichtheden n_i en energieopsluittijden τ. Toekomstige fusiecentrales zullen een vermogen hebben van typisch 1 GW. De plasma's hierin zullen gekenmerkt zijn door een ionentemperatuur T_i = 120 miljoen K, en een opsluitingskwaliteit $n_i\tau$ van ongeveer 2×10^{20} m^{-3} s.



Copyright © 1996 Contemporary Physics Education Project (CPEP). Translation by Forschungszentrum Jülich / TEC

CPEP is een vereniging zonder winstoogmerk van leraren, docenten en fysici, met een belangrijke inbreng van studenten. Officiële instellingen, privésponsors en nationale laboratoria hebben bijgedragen tot dit project en blijven onmisbaar voor het succes van dit project in de toekomst. Deze poster is ontworpen door CPEP met de steun van de volgende organisaties: het AIP journal *Physics of Plasmas*, de Division of Plasma Physics of the APS, General Atomics, Lawrence Livermore National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Princeton Plasma Physics Laboratory, the University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, het U.S. Department of Energy en het Trilateral Euregio Cluster. Afbeeldingen: NASA, the National Solar Observatory, Steve Albers en de bovenvermelde organisaties.