

Kernfusie: Principes Status, Vooruitzichten



***Jef ONGENA
Laboratorium voor Plasmafysica
Koninklijke Militaire School, Brussel***

***Museum voor de Geschiedenis van de Wetenschappen
Universiteit Gent
5 Maart 2015***

Hebben we fusie nodig ?

Persoonlijke opinie, ter overweging voor iedereen

- Bevolkingsexplosie, vooral in de opkomende economieën
- Het leeuwendeel van de wereldenergieproductie is van fossiele oorsprong (80 - 90%)
 - Klimaatsverandering door CO₂ (?)
 - Eindig
 - Moeten denken aan vervanging: slechts twee opties - nucleair en hernieuwbaar
- Hernieuwbare energie (hydro, wind, zon,...) moet bijdragen, maar:
 - Grote fluctuaties: dag/nacht, zomer/winter, storm/windstil,..
 - Lage energiedichtheid : grote installaties en kost
 - Nood aan backup, stockage en grote interconnecties
 - Niet eenvoudig en zal de nodige tijd vragen
- Een brede energiemix is nodig, waarin geen enkele optie wordt uitgesloten à priori
- Fusie heeft een groot potentieel om een belangrijke rol te spelen in zulk een mix

Fusie : energiebron van het heelal



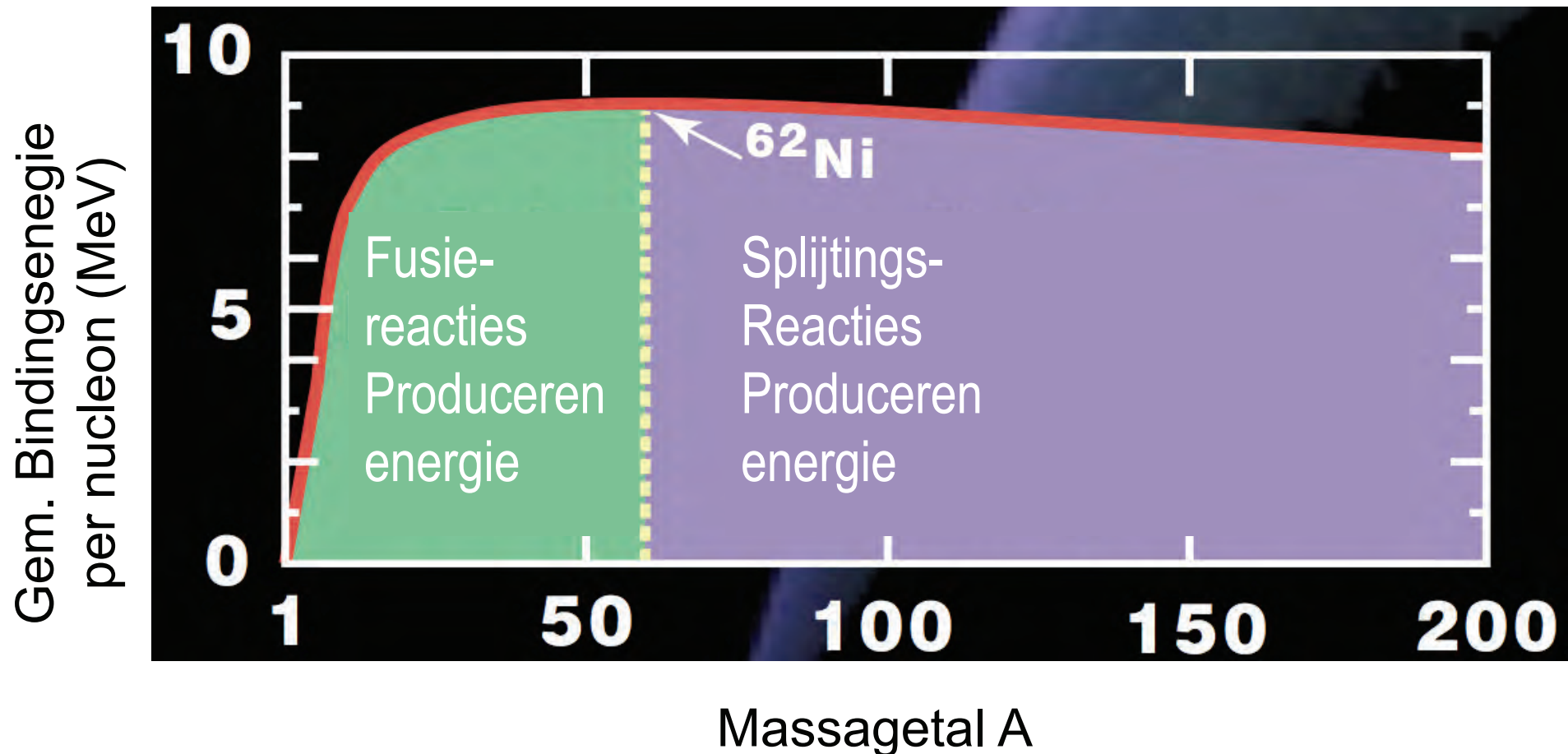
<https://www.youtube.com/watch?v=udAL48P5NJU>

Overzicht

- Fusiereacties
 - In de zon
 - Op aarde
- Twee opties voor de realisatie van fusie op aarde
 - Inertiële Fusie
 - Magnetische Fusie
- Twee opties voor de realisatie van magnetische fusie op aarde
 - Met een (grote) stroom in het plasma: tokamak
 - Zonder plasmastroom: stellarator
- Stand van zaken: JET, ITER
- Toekomst: DEMO
- Onderzoek ter voorbereiding van ITER, DEMO
- Besluit

Energiewinst bij kernreacties

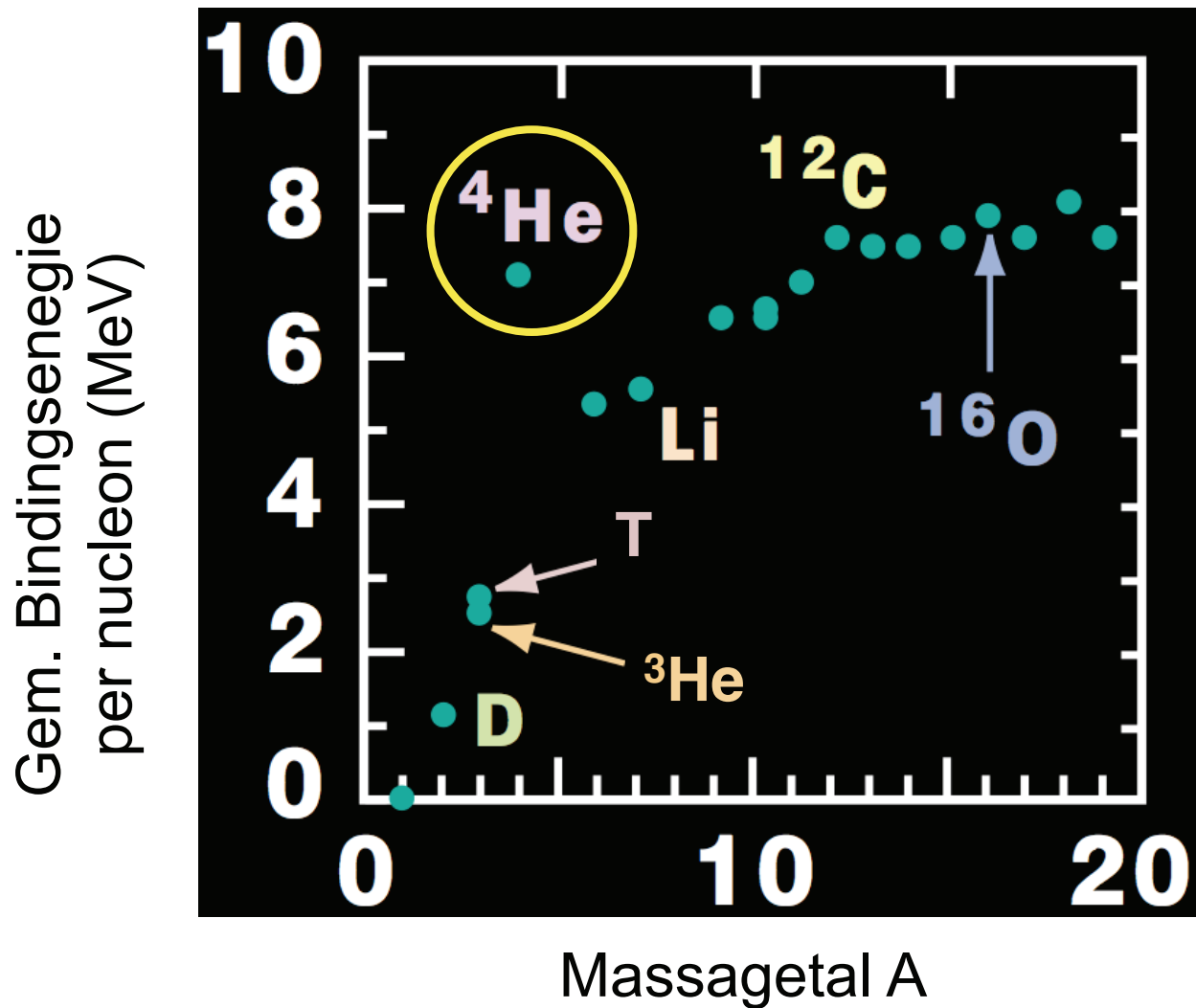
Resulteert uit het verschil in massa of ook bindingsenergie



Maximum bij $\sim ^{62}\text{Ni}$: grote gevolgen voor zware sterren

Energiewinst bij fusiereacties

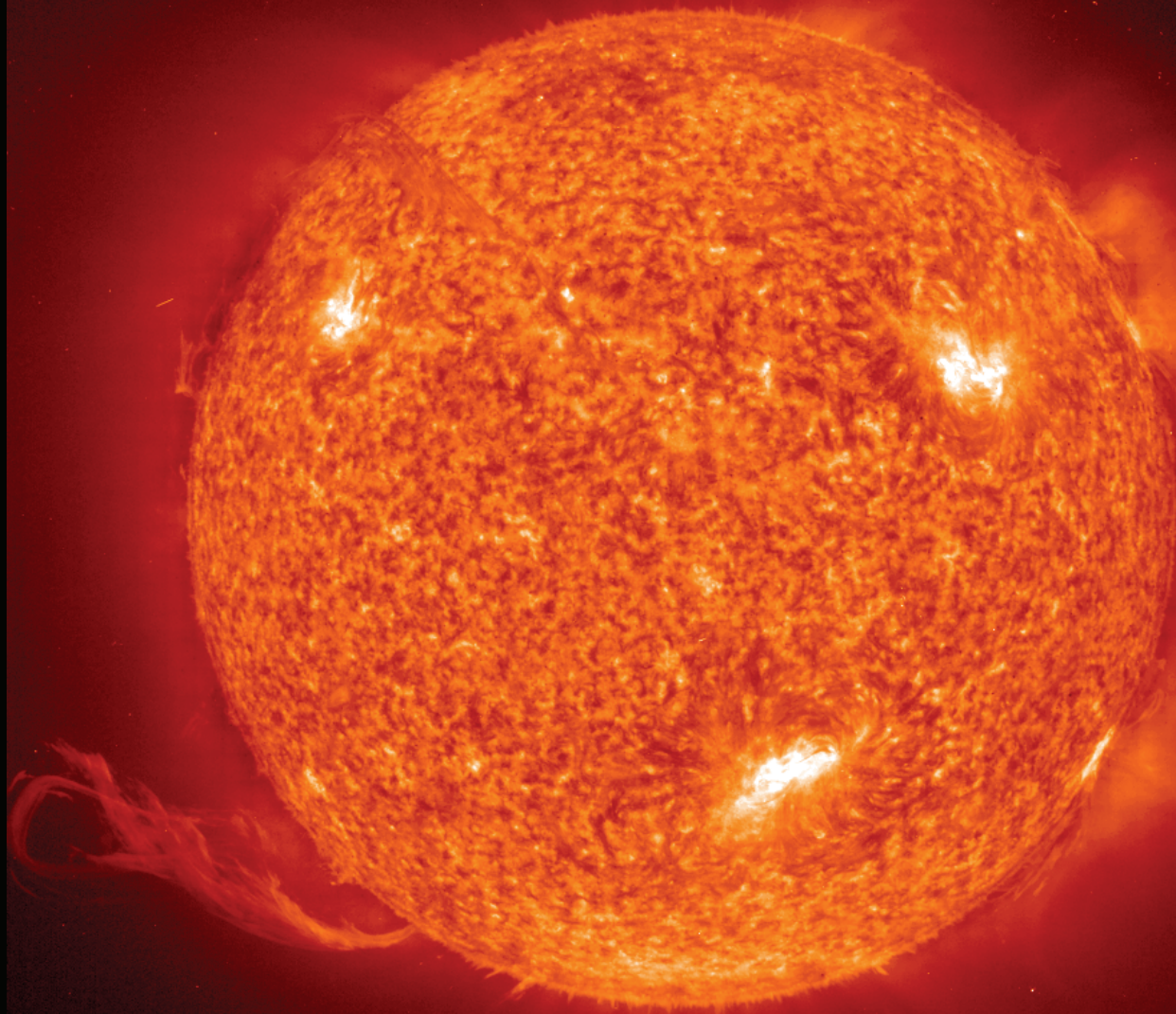
^4He heeft een uitzonderlijk grote bindingsenergie



Kern-deeltje	Totale Bindings-Energie (MeV)
D = ^2H	2.22457
T = ^3H	8.48182
^3He	7.71806
^4He	28.29567

Grote energiewinst wanneer ^4He ontstaat uit de fusiereactie

Fusie in de zon



Temperaturen in de zon

Temperatuur aan de rand

Met de Stefan-Boltzmann wet en gemeten luminositeit L

$$L = 4\pi\sigma R_{\text{zon}}^2 T_{\text{rand}}^4 \rightarrow T_{\text{rand}} = 5780\text{K}$$

(σ = Stefan-Boltzmann constante = $5.670 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Temperatuur in het centrum

Thermische energie =

Potentiële energie van de zwaartekracht :

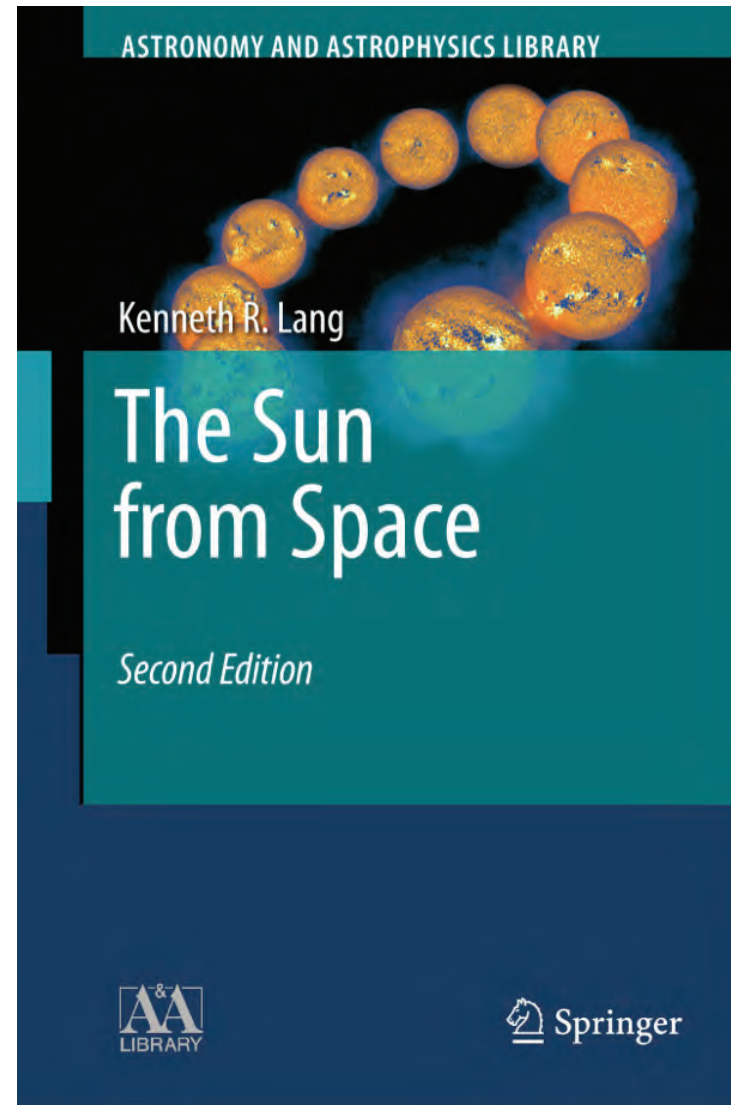
$$1.5k T_{\text{centrum}} = Gm_p M_{\text{zon}}/R_{\text{zon}} \rightarrow T_{\text{centrum}} = 15\,600\,000\text{ K}$$

(G =gravitationele constante= $6.6726 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$)

k =constante van Boltzmann= $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

m_p = massa van het proton = $1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$)

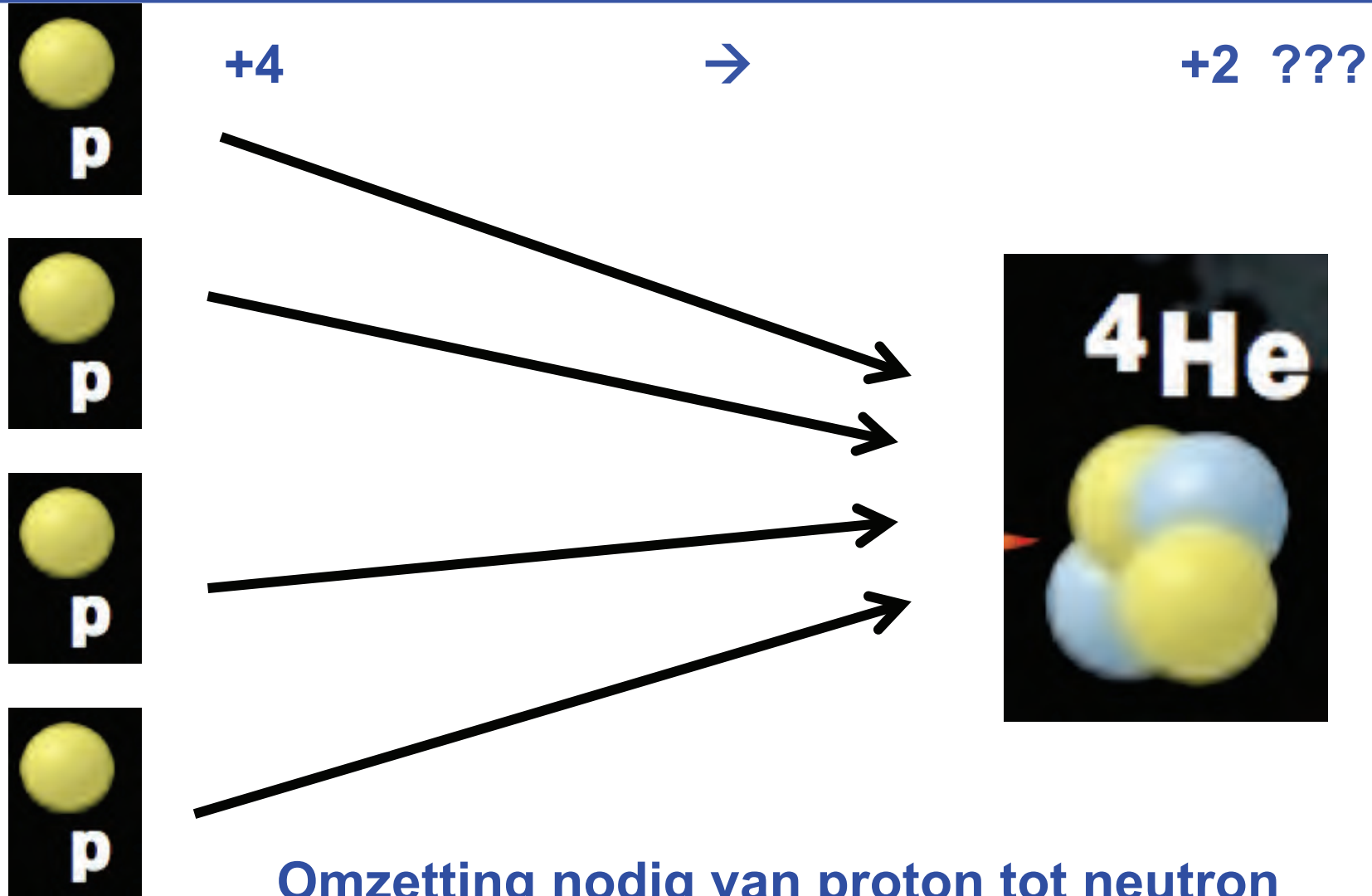
Interessante recente referentie over onze zon



Fusie van waterstof tot helium

Group #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period																			
1	1 H	Fusie →																2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	(117) (Uus)	118 Uuo	
* Lanthanoids			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
** Actinoids			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Helium uit (enkel) protons ?



Omzetting nodig van proton tot neutron

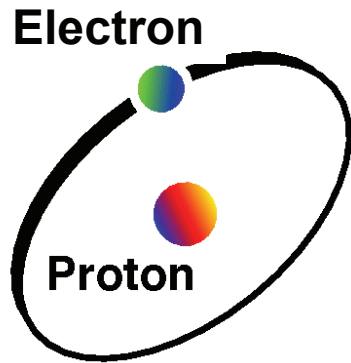
Moeilijke en (dus) trage reactie (goed voor ons...)

In de zon: Elke seconde 4 miljoen ton massa \rightarrow energie

Fusie op aarde

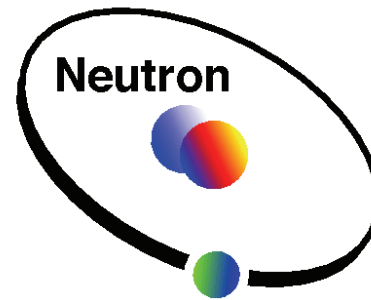


Waterstof en zijn isotopen



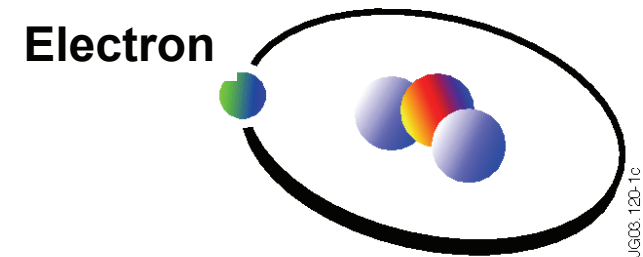
Waterstof (${}^1_1\text{H}$)

Natuurlijk
isotoop
Stabiel



Deuterium (${}^2_1\text{H}$) of D




Natuurlijk
Isotoop
Stabiel



Tritium (${}^3_1\text{H}$) of T

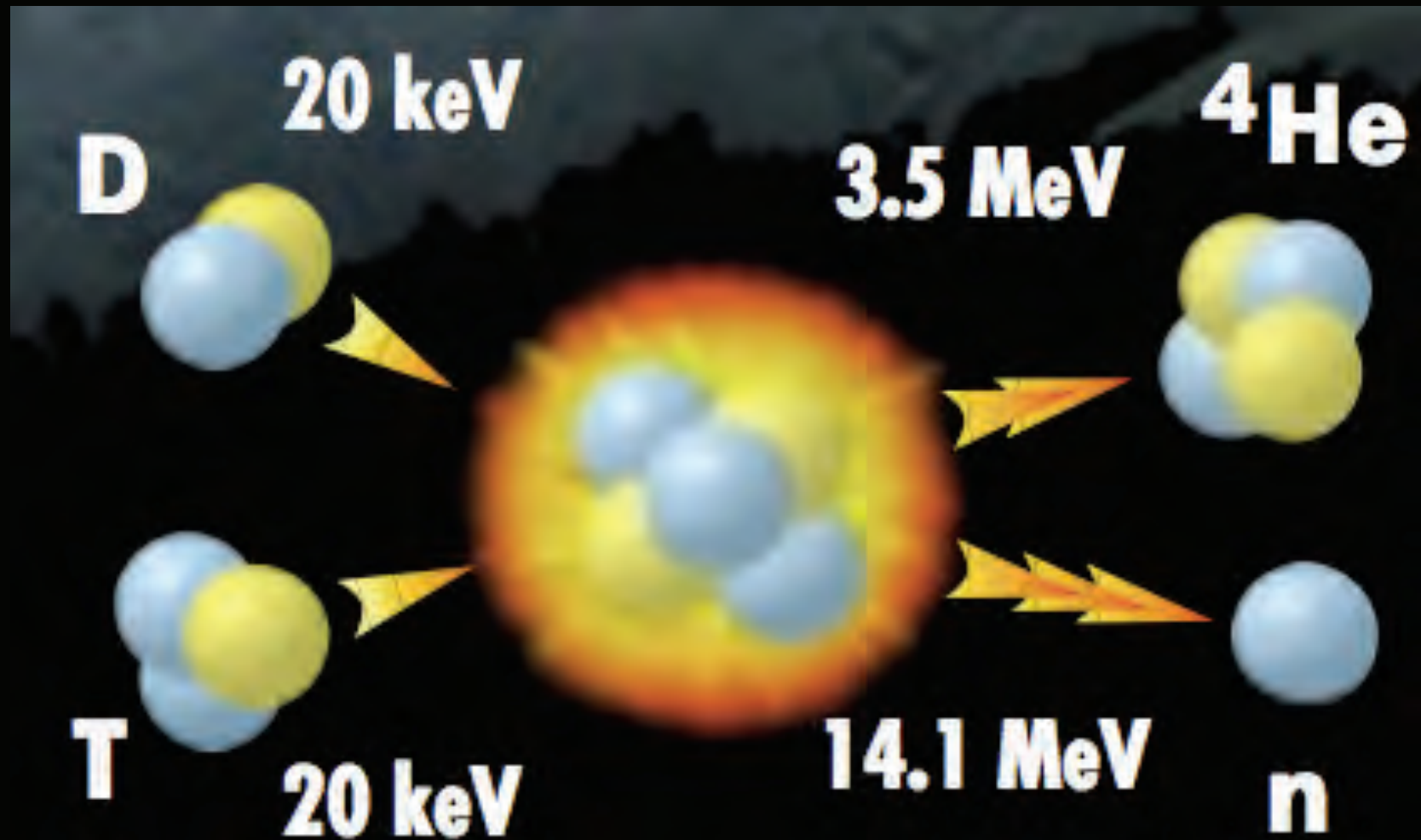
Kunstmatig
Isotoop
Halfwaardetijd
12.3 jaar

'Gemakkelijkste' fusiereacties

Fusie Reactie	Reactie-Temperatuur (in miljoen graad)	Vrijgestelde Energie (in keV)
$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ 	100-200	17,600
$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ 	~700	18,300
$D + D \rightarrow \begin{cases} {}^3\text{He} + n \\ T + p \end{cases}$ 	~400	~4,000
	~400	~4,000

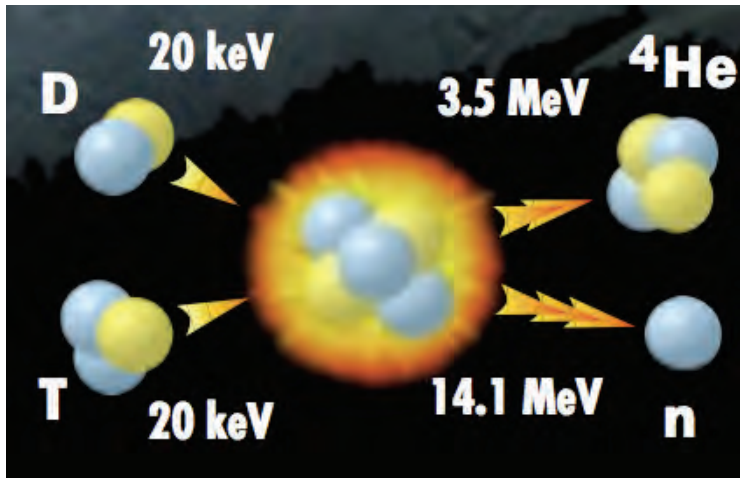
Uitgebreide database over fusie reacties : http://pntpm3.ulb.ac.be/Nacre/barre_database.htm

De 'gemakkelijkste' fusiereactie op aarde

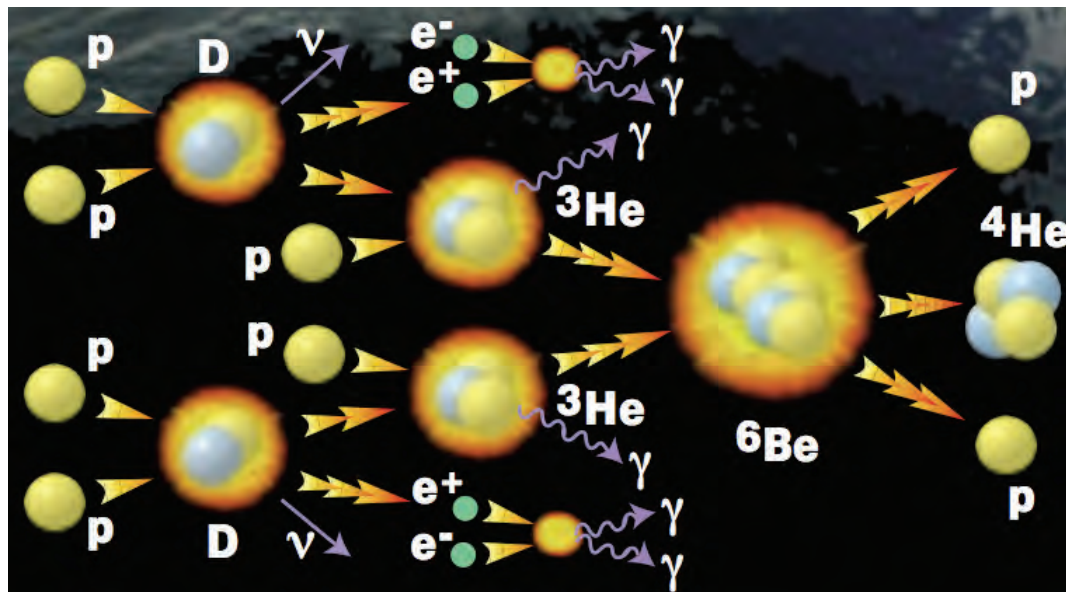


Vergelijking: fusiereacties op aarde en in de zon

Op aarde (D-T)



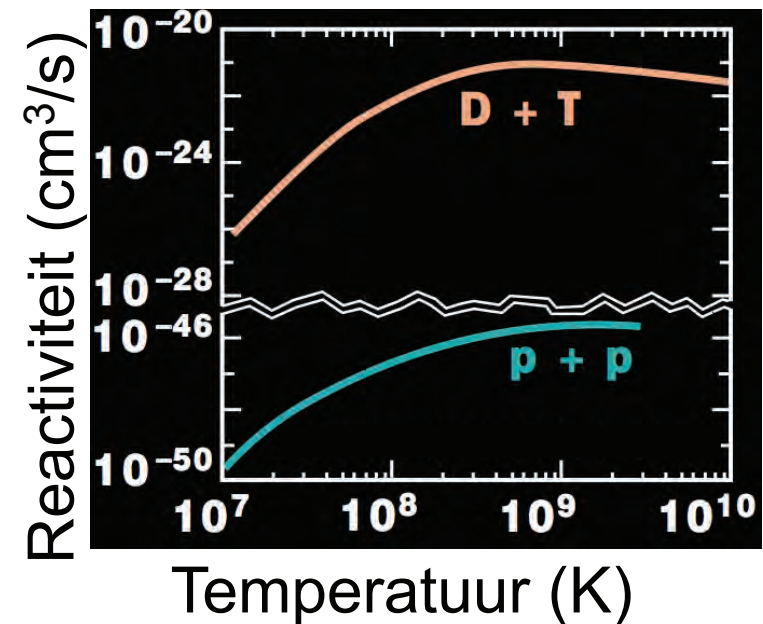
In de zon (p-p)



J.Ongena

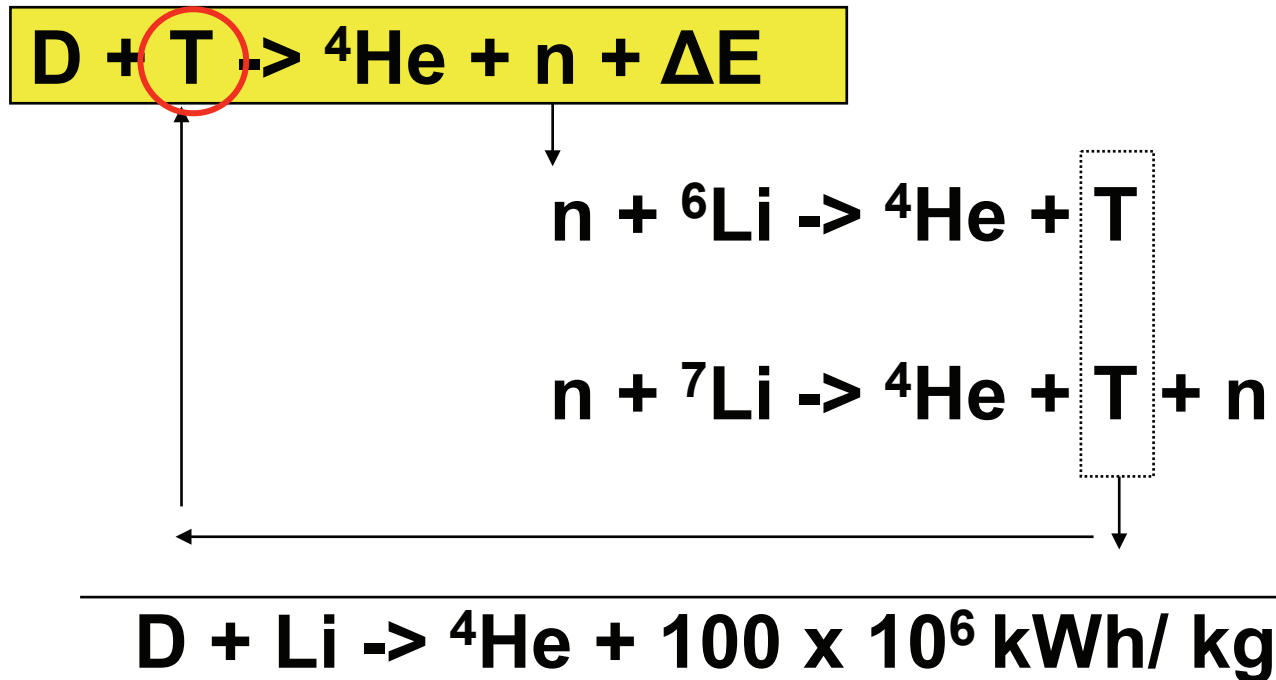
Principes van kernfusie

D-T reactie heeft een **10^{25} maal** grotere reactiviteit (cm^3/s) dan de p-p reactie



Universiteit Gent, 5 Maart 2015

Hoe Tritium aanmaken ?



Voordelen van fusie-energie

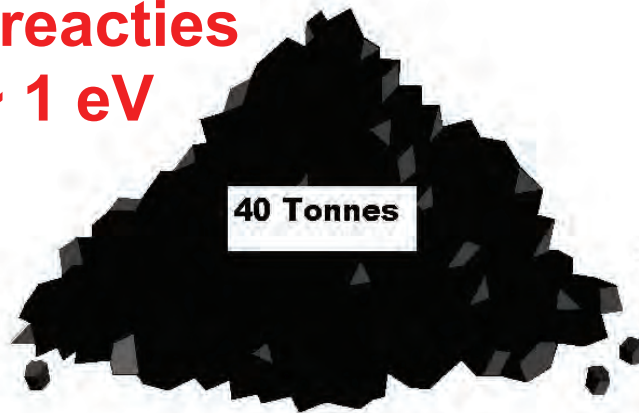
- **Minimale impact op het milieu**
 - Geen broeikasgassen, geen ozonlaag aantasting, geen zure regen,...
- **Geen stockage nodig op zeer lange termijn van actief afval**
 - Tritium verdwijnt in de reactie
 - Recyclage van de metalen wand de reactor na ~ 100 jaar
- **Inherent veilig**
 - Geen 'runaway' reacties mogelijk, na-warmte niet in volume
 - Geen accidenten zoals Tchernobyl / Three Mile Island / Fukushima
- **Brandstoffen (Water en Lithium) rijkelijk voorhanden overal op aarde**
 - Sterk verminderde afhankelijkheid van de leverancier (Midden-Oosten, Rusland, ...)

Propere en duurzame energie (zoals in de zon) voor duizenden (miljoenen) jaren !

Weinig brandstof nodig voor enorm veel energie

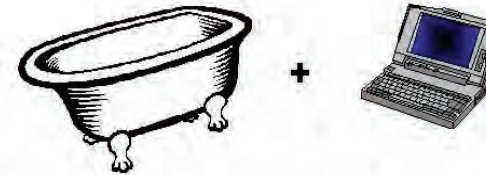
- **Basisgrondstoffen** van een fusiereactor zijn **water en lithium** (voor de produktie van tritium)

Chemische reacties
energie ~ 1 eV



=

Fusiereacties
energie $\sim 10^7$ eV

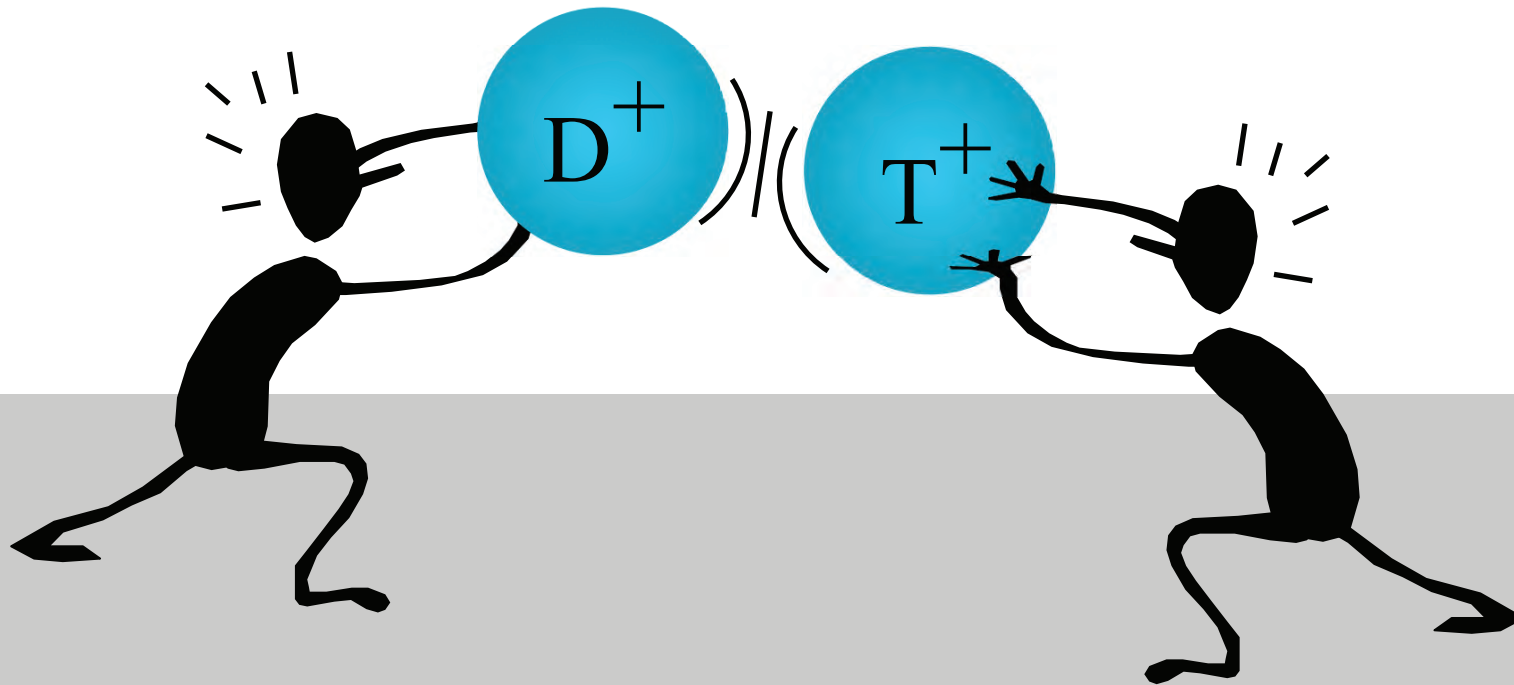


45 litres water + 1 lap-top battery

- Lithium in een laptop batterij + een halve badkuip water:
200.000 kWh
- ~ 25 jaar elektriciteit voor een 'typische' Europeaan !

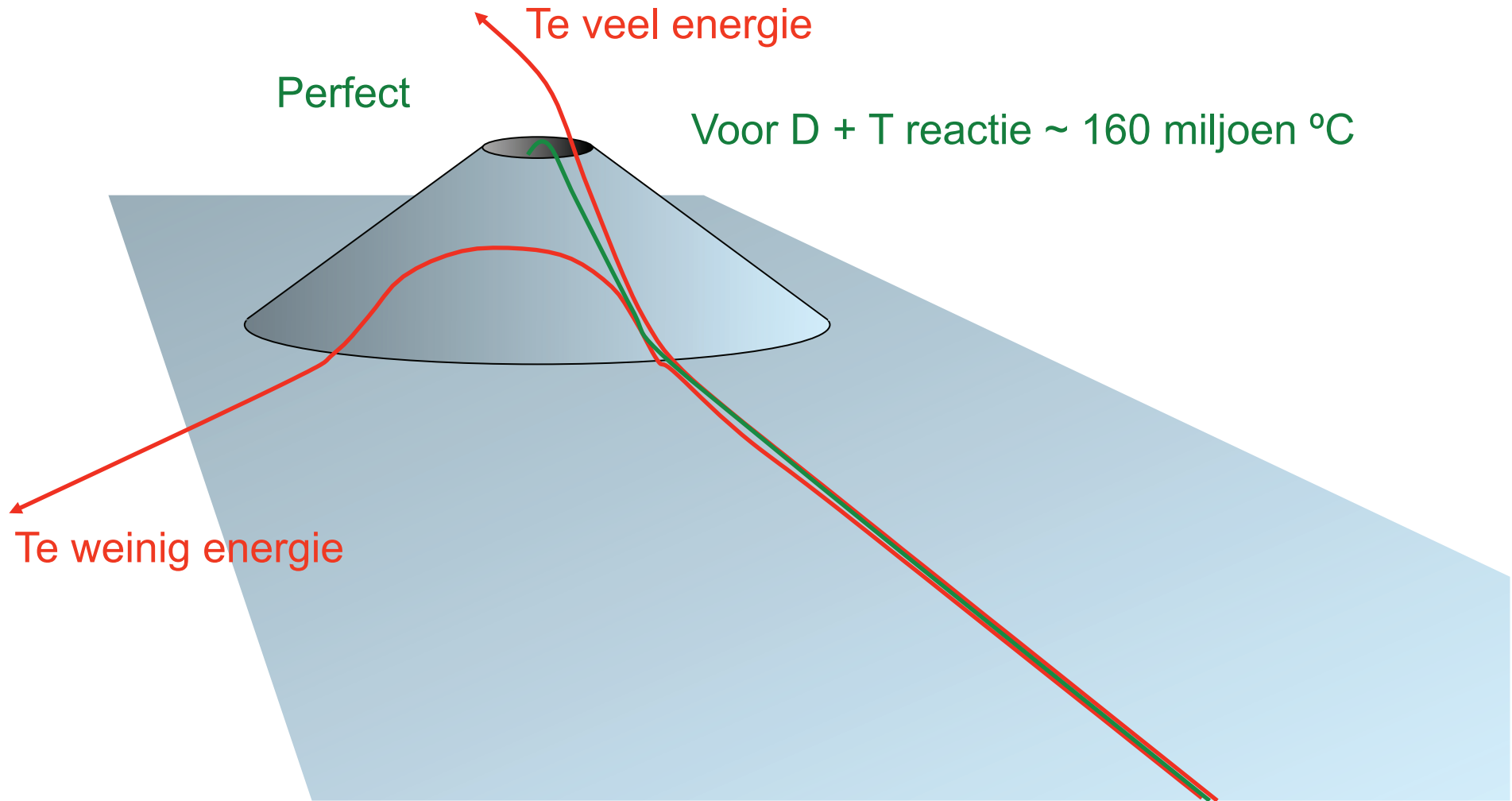
Maar...

Beide kernen zijn positief geladen...
ze stoten mekaar af !

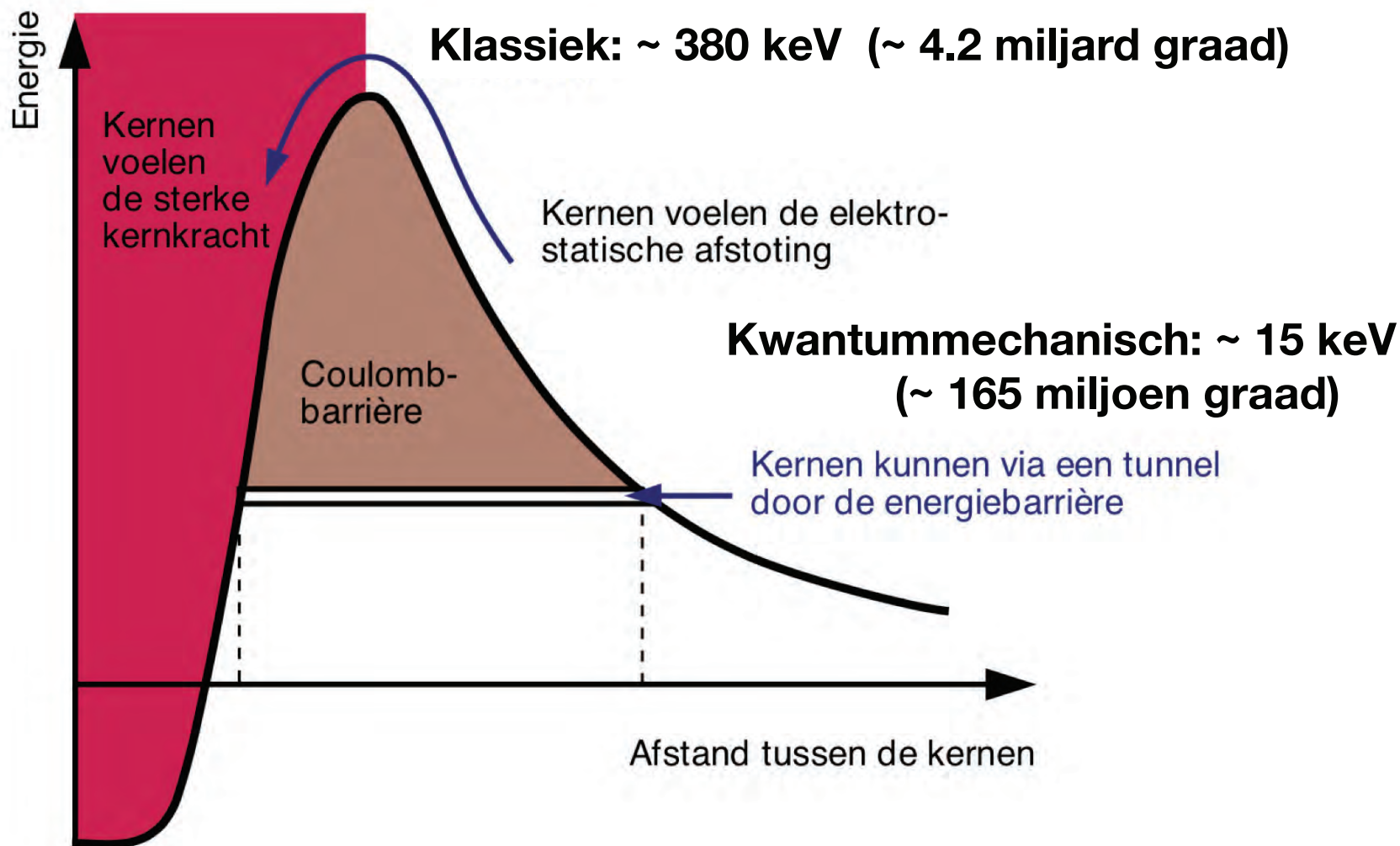


daarom is veel energie nodig om ze te doen fusioneren

Optimale energie voor fusie ?



De meeste fusiereacties gebeuren niet-klassiek : tunneling



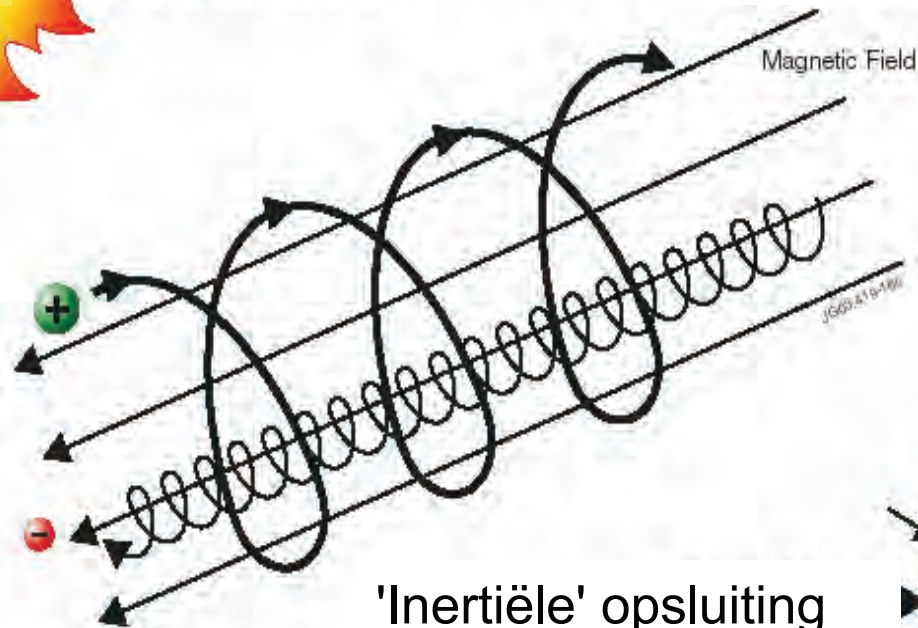
Hoe materie opsluiten bij extreem hoge temperaturen ?



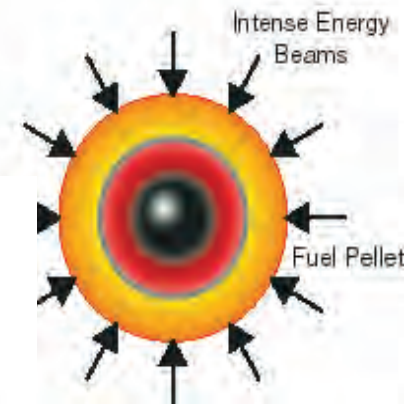
ZON

Opsluiting door
zwaartekracht

Opsluiting met
magneetvelden



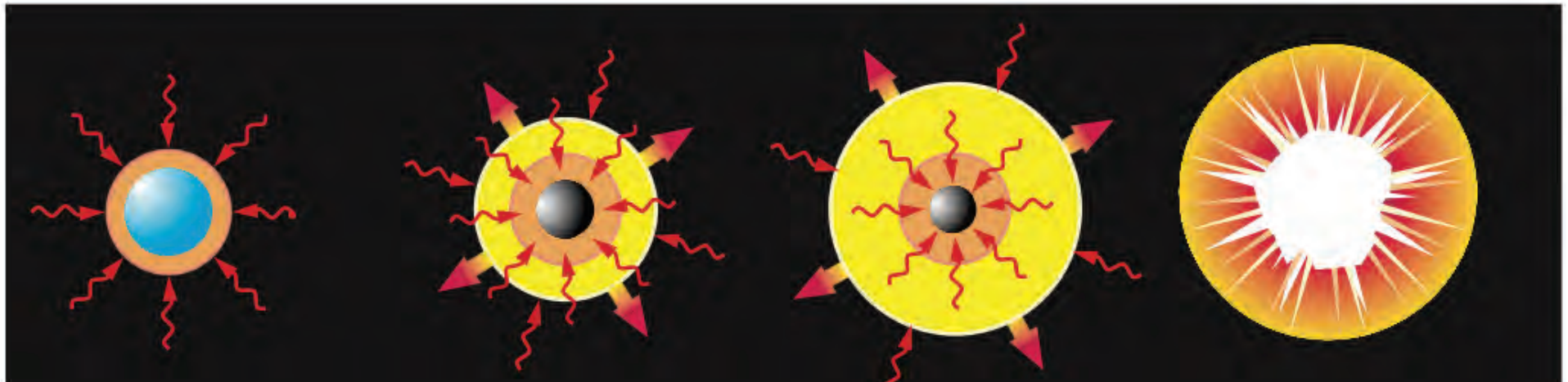
'Inertiële' opsluiting
(door de traagheid)



Realisatie van fusie op aarde

A. Inertiële Fusie

Met krachtige lasers of deeltjesbundels
Compressie van een klein sfeertje gevuld met D+T



Verhitting
van het
oppervlak

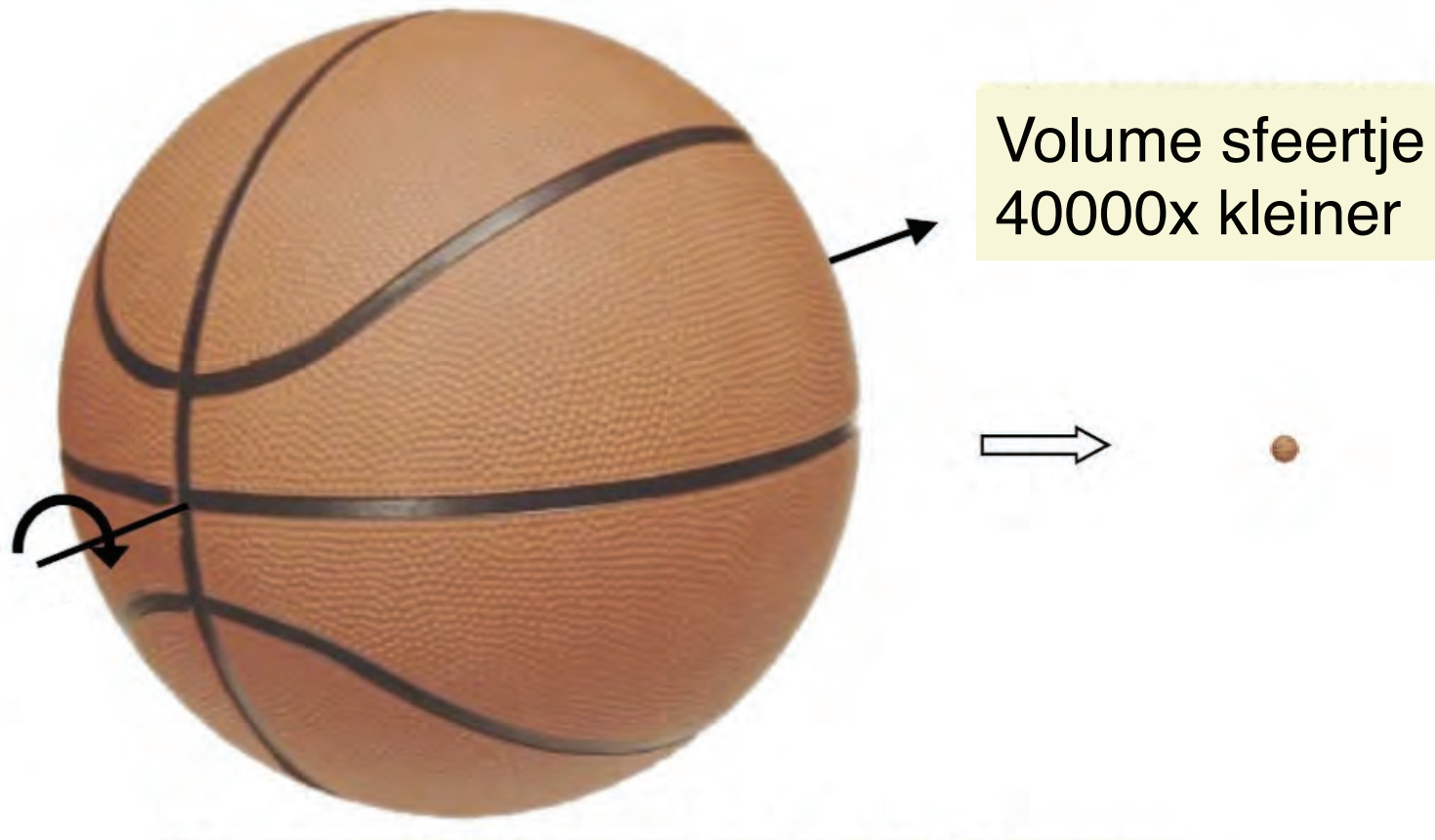
Compressie

Ontsteking

Fusie

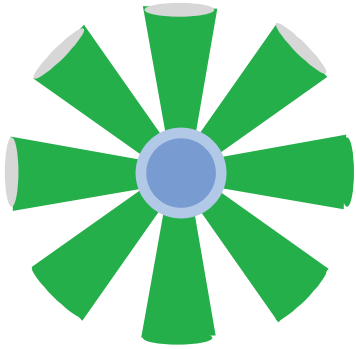
Realisatie van fusie op aarde

A. Inertiële Fusie

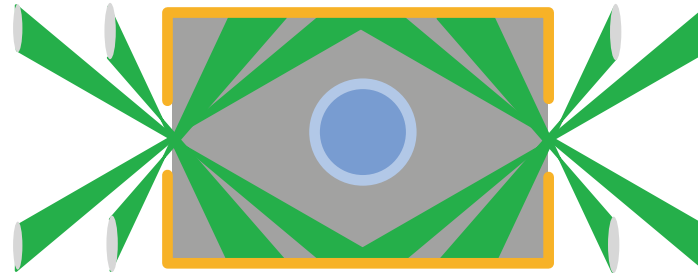


Extreem uniforme verhitting vereist

Twee opties: directe and indirecte verhitting



directe verhitting met lasers



indirecte verhitting met X-stralen

Betere efficiëntie maar:

- stabiliteit ↓
- symmetrie van de implosie ↓

Minder efficiënt maar:

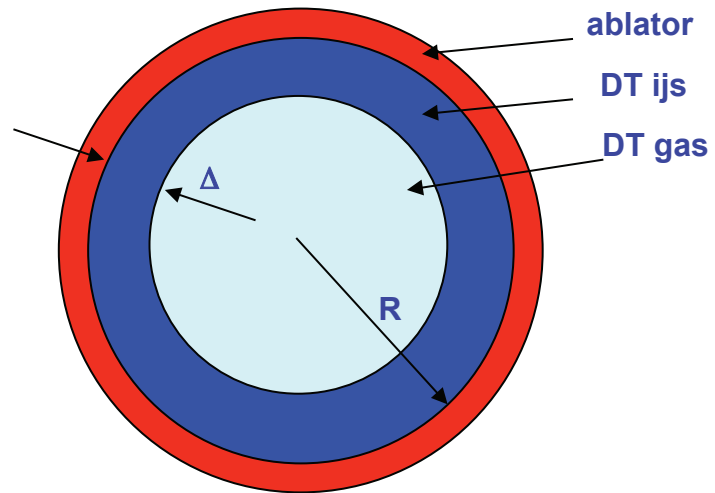
- stabiliteit ↑
- symmetrie van de implosie ↑

Belangrijkste onderzoekslaboratoria:

National Ignition Facility – NIF (Livermore, USA)

Laser Mégajoule – LMJ (Bordeaux, Frankrijk)

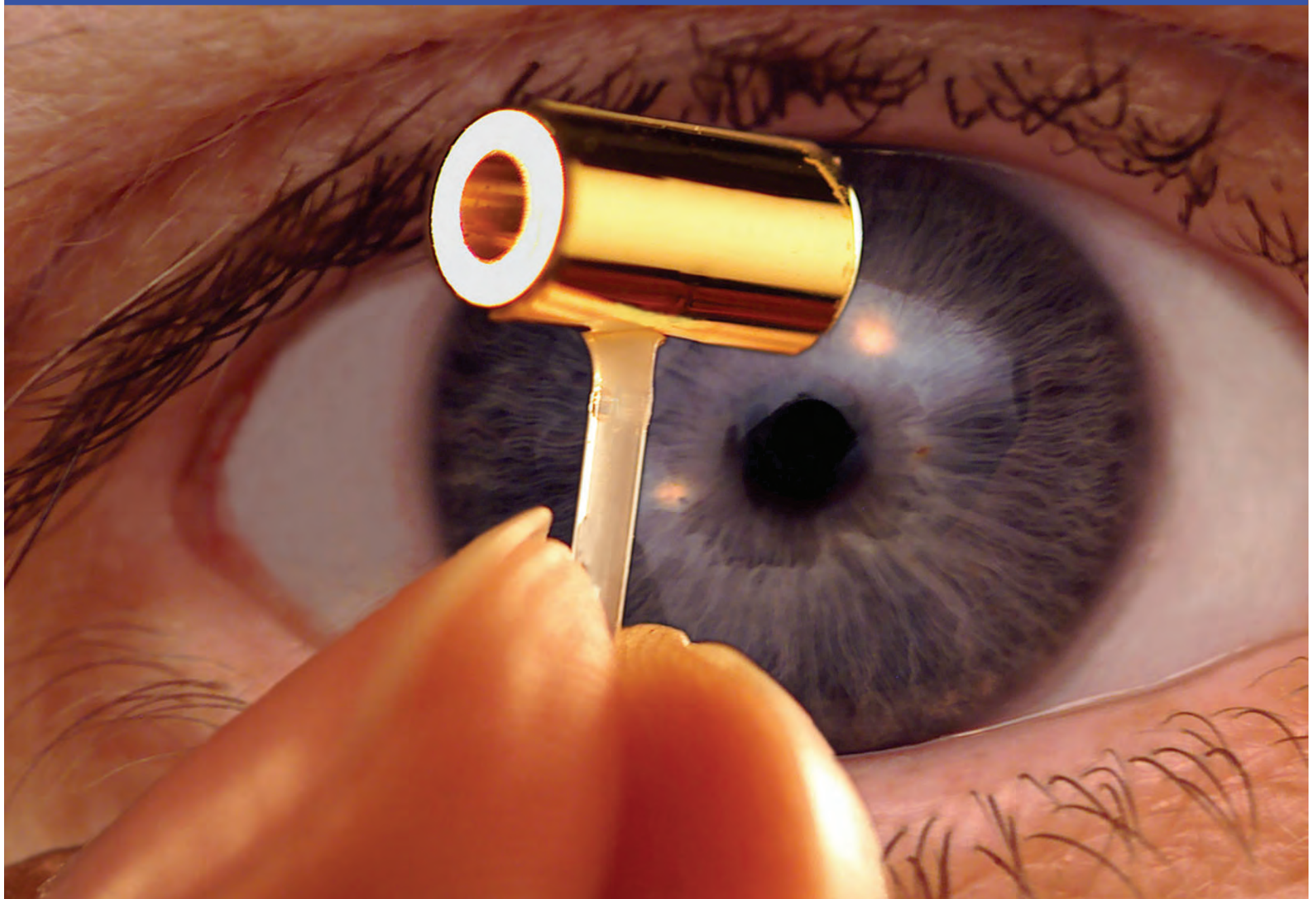
Sfeertjes in gebruik bij inertiële fusie



$R \sim 1 \text{ mm}$
 $\Delta \sim 0.2 \text{ mm}$



Grootte van een 'hohlraum' in inertieële fusie



USA : National Ignition Facility (NIF) Livermore, California

4 MJ laser – 192 laserstralen



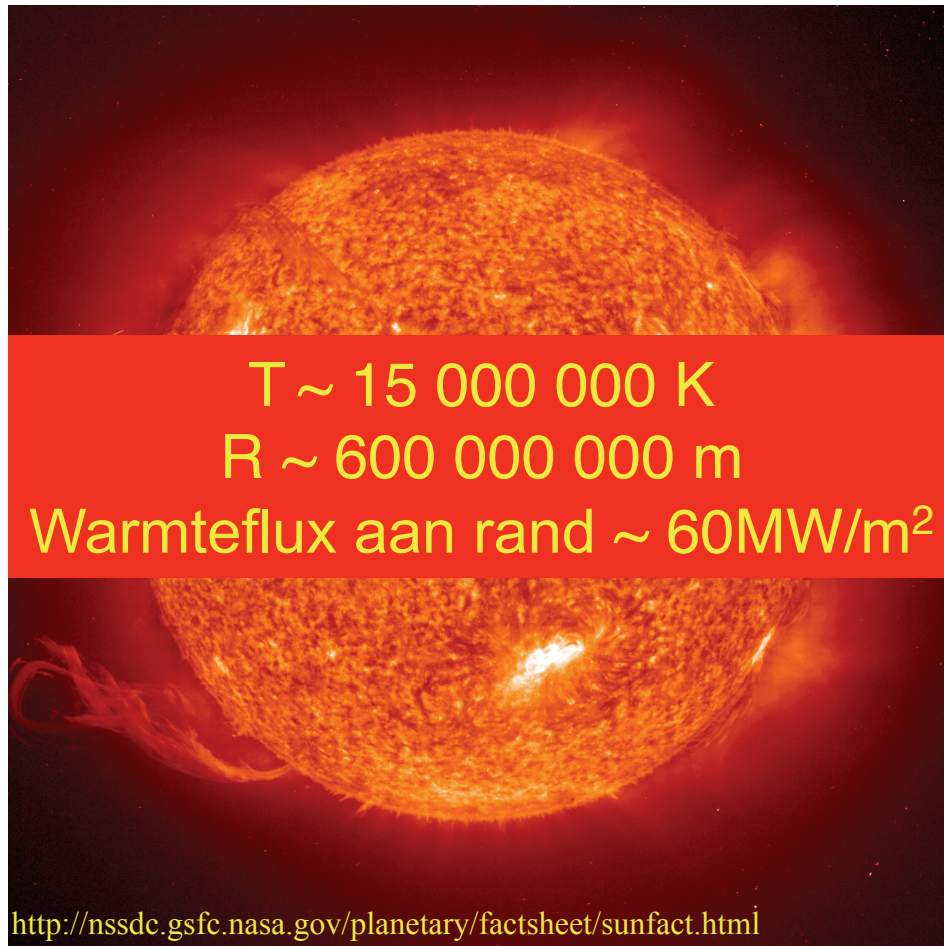
In gebruik
sinds Maart
2009



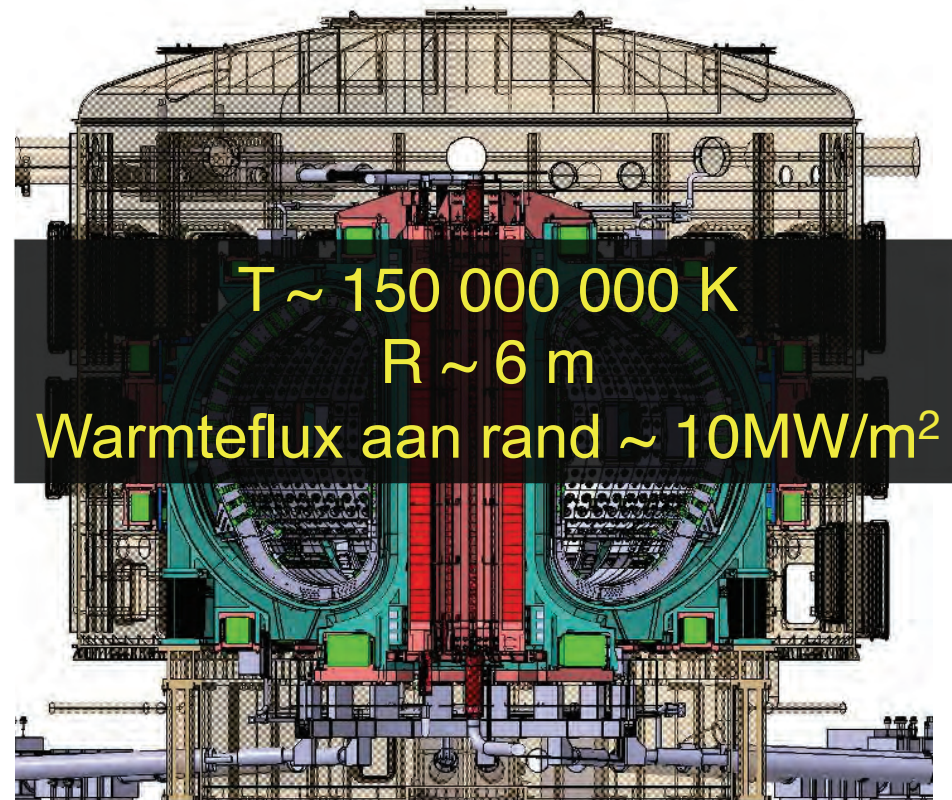
~ Een experiment / week

Realisatie van fusie op aarde: B. Magnetische Fusie

Zon

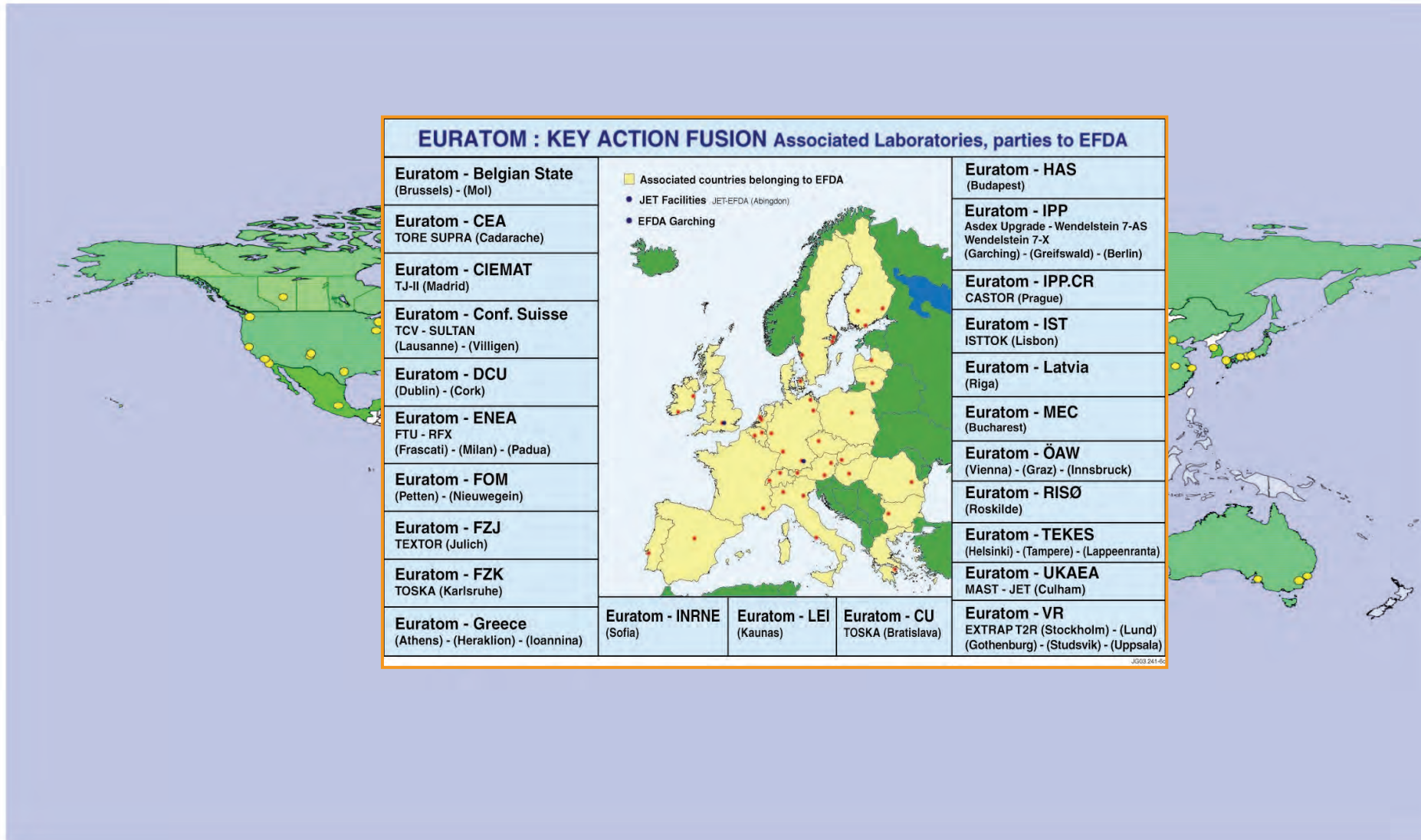


ITER (Frankrijk, in constructie)

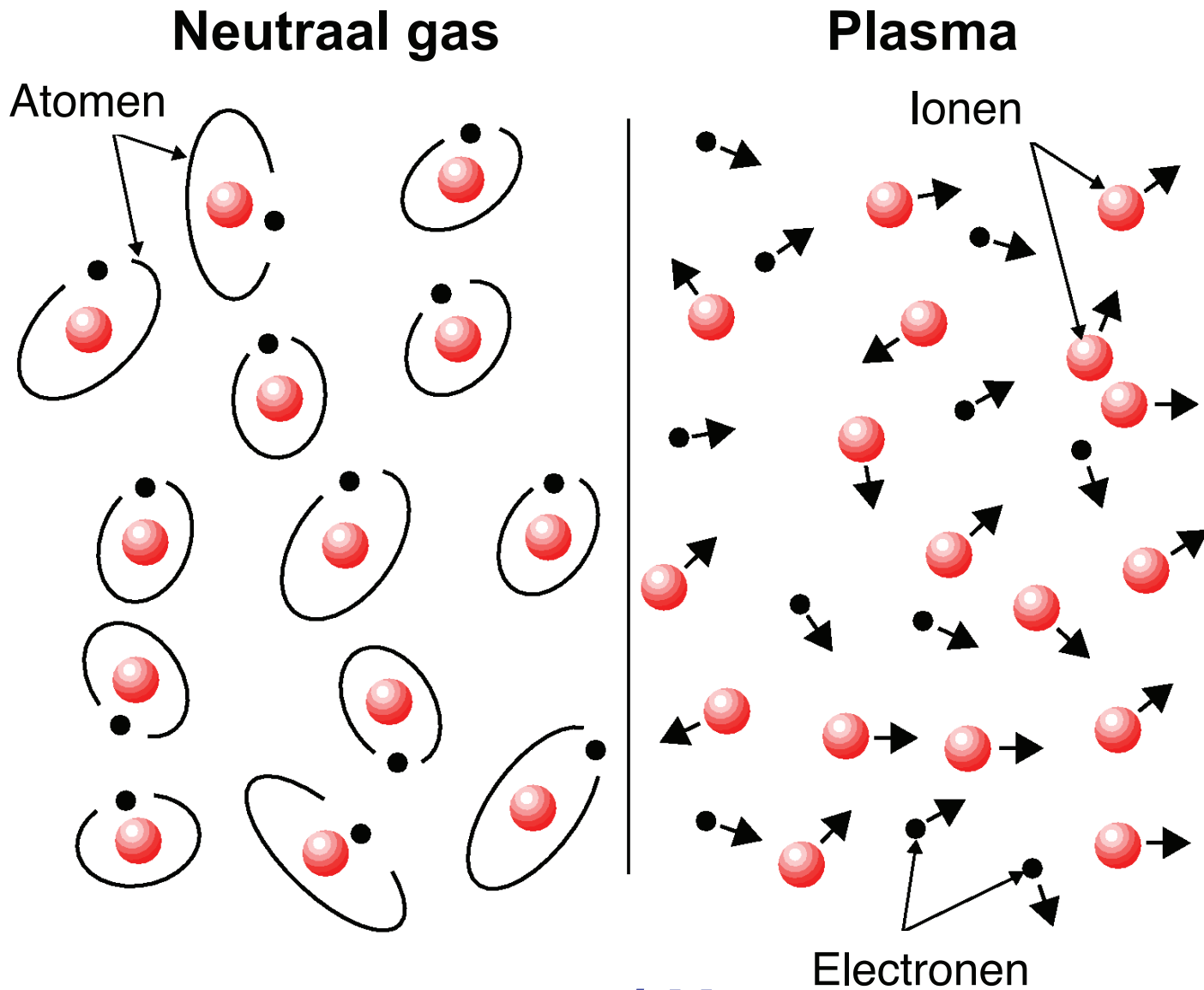


Onderzoek naar magnetische fusie in de wereld

Europa staat aan de top



Verschil Gas / Plasma

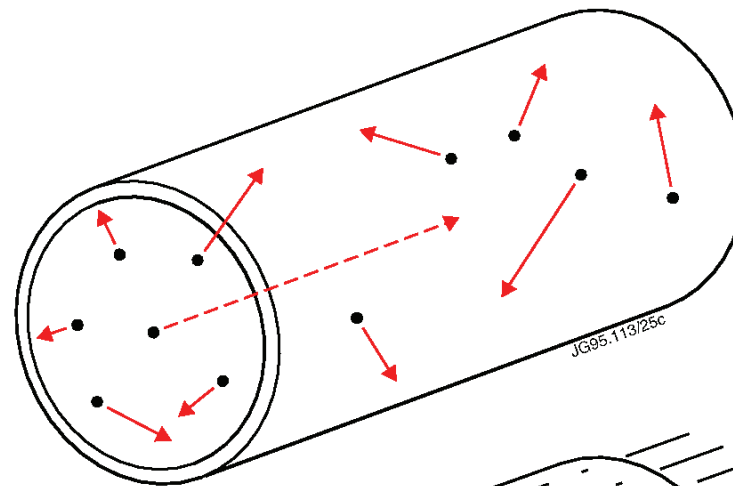


JG99.90/2c

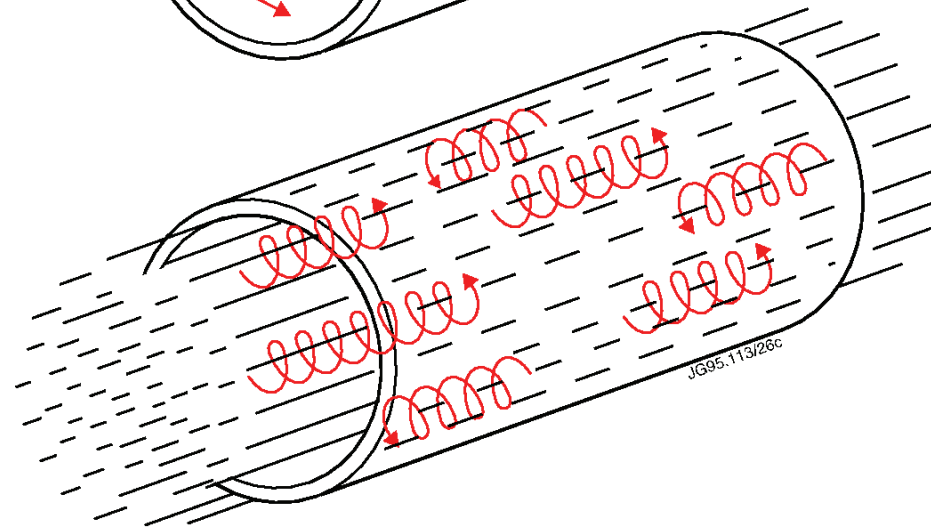
Lage temperatuur / Hoge temperatuur

Principe van magnetische fusie

Geladen deeltjes 'kleven' aan de magneetveldlijnen
(Lorentzkracht)



Geen magneetveld

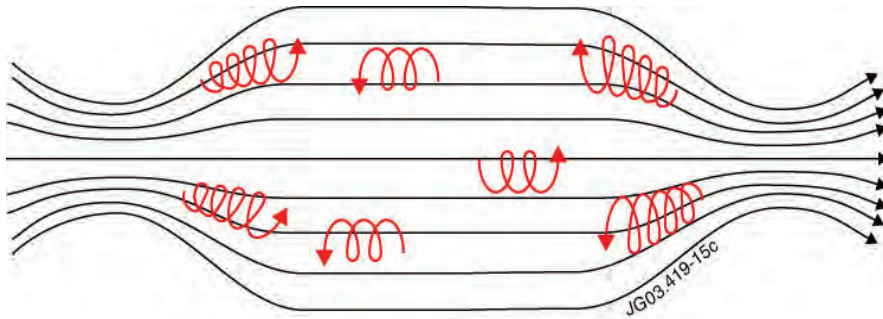


Met magneetveld

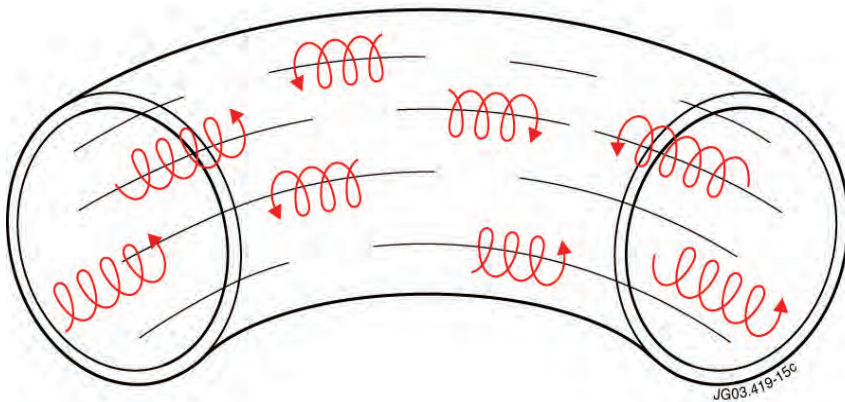
Principe van magnetische fusie

Hoe de eindverliezen beperken?

Twee mogelijke oplossingen



- 'sluit' het magneetveld aan uiteinden
verliezen blijven té groot



- 'sluit' de veldlijnen op zichzelf
⇒ toroïdale configuratie, MAAR

Geen opsluiting in een puur toroïdaal veld : Ladingsscheiding !

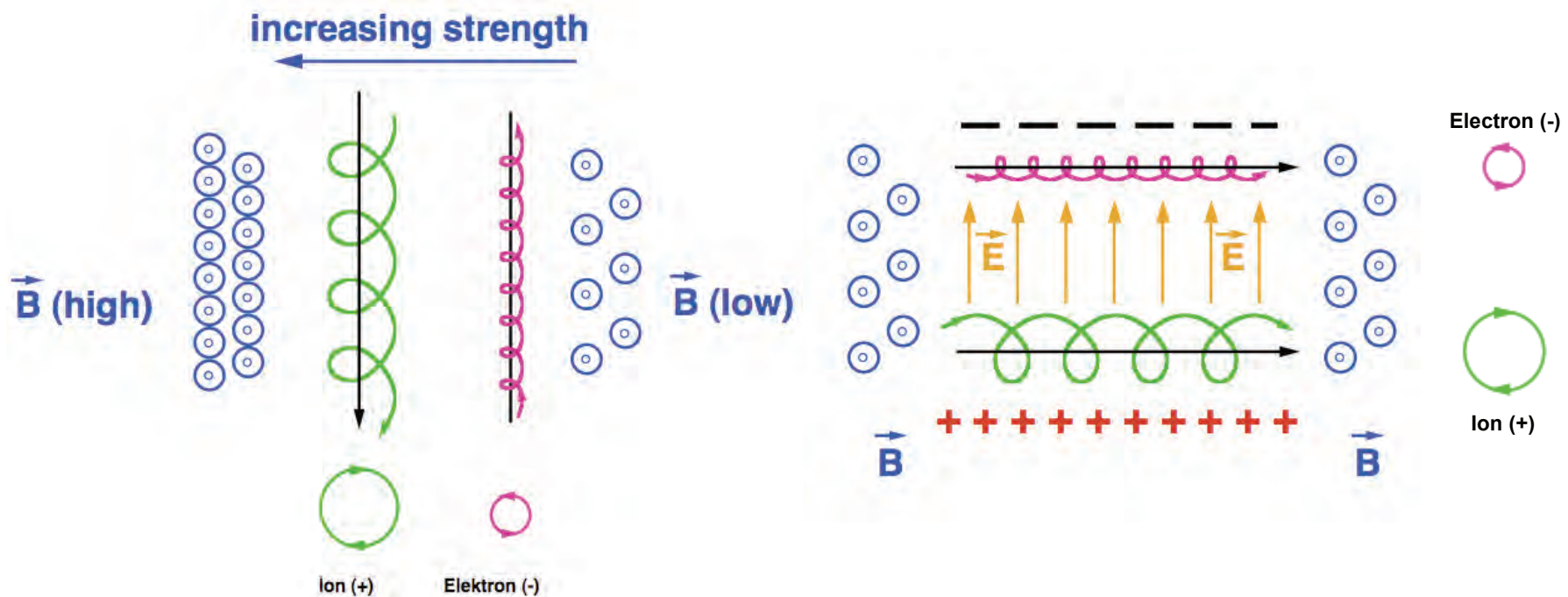
Fundamentele Oorzaak:

Gyrostraal hangt af van magnetenveld en deeltjessnelheid

$$\rho_L = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

Puur toroïdaal magnetenveld
Ladingsscheiding → Elektrisch Veld

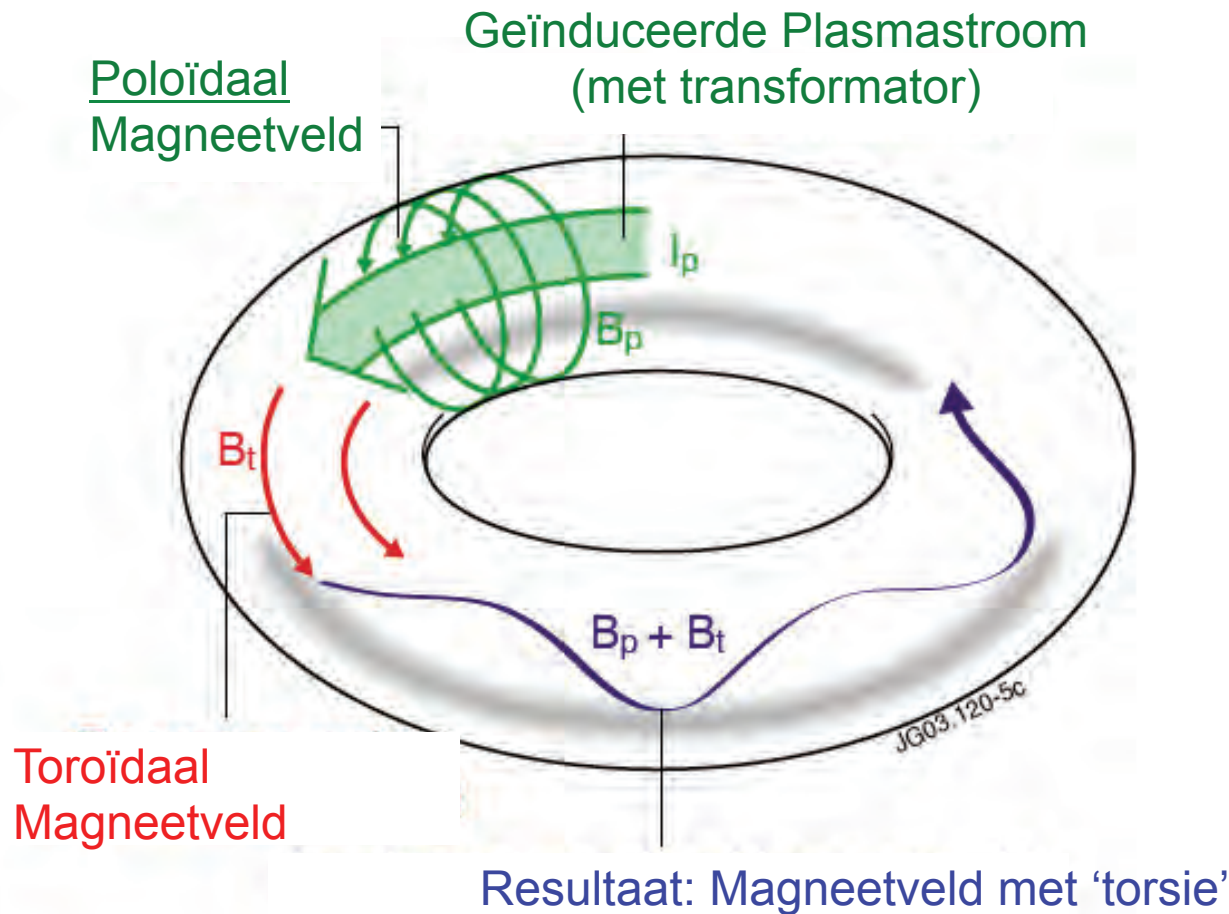
Magnetenveld + Elektrisch Veld
ALLE deeltjes → naar buiten!



Realisatie van een geschikt magneetveld: Optie 1

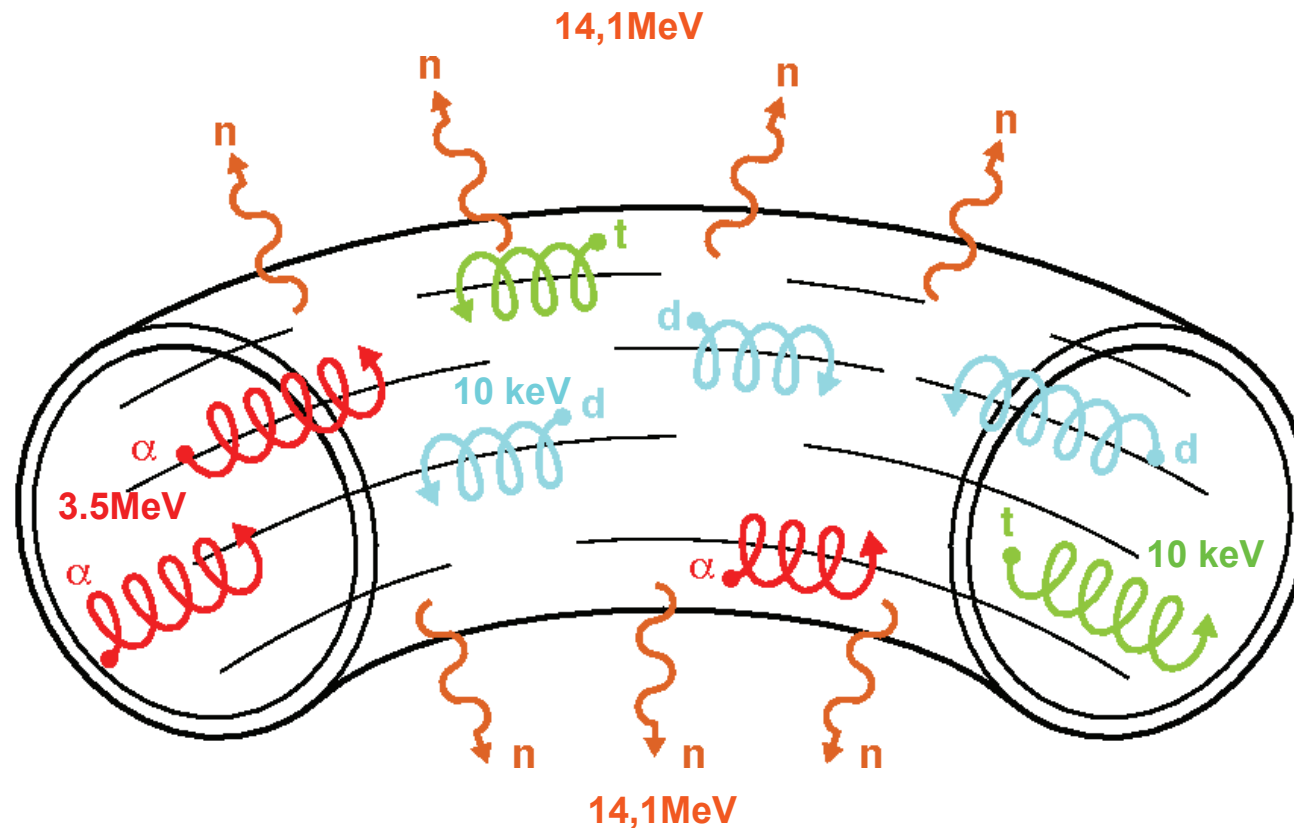
Tokamak

Grote stroom geïnduceerd in het plasma (~100kA - 10MA)



Eindconfiguratie : Tokamak

Een torus waarin alle reactieproducten (geladen deeltjes) stabiel worden opgesloten
Energetische neutronen ontsnappen (geen lading)



Nota :
1 keV = 11 600 000 °C

Tokamak – Samenvatting

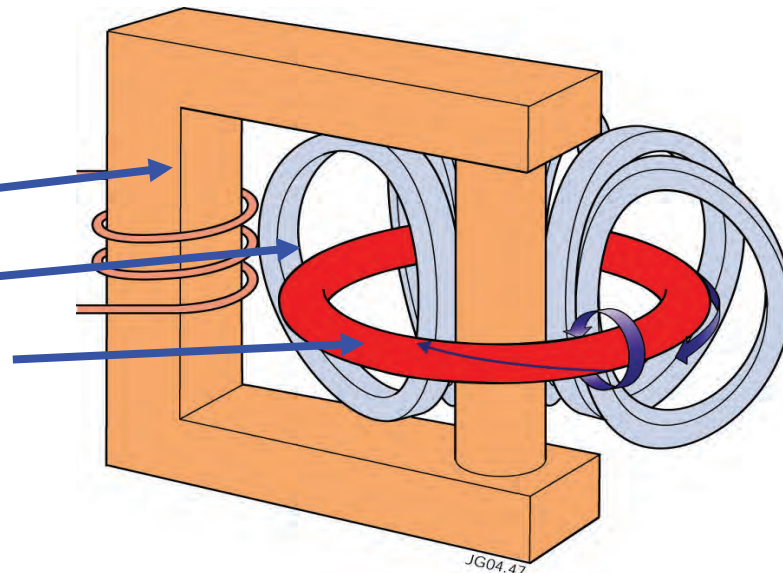
- Tokamak, uit het russisch:

Тороидальная Камера С Магнитными Катушками
toroidalnaya kamera, s magnitnimi katushkami
Of “toroidale kamer” met “magneetspoelen”



- Uitgedacht door: Andrei Sacharov and Igor Tamm
(beide Nobelprijswinnaars)
In het Kurchatov Instituut in Moskou in 1950

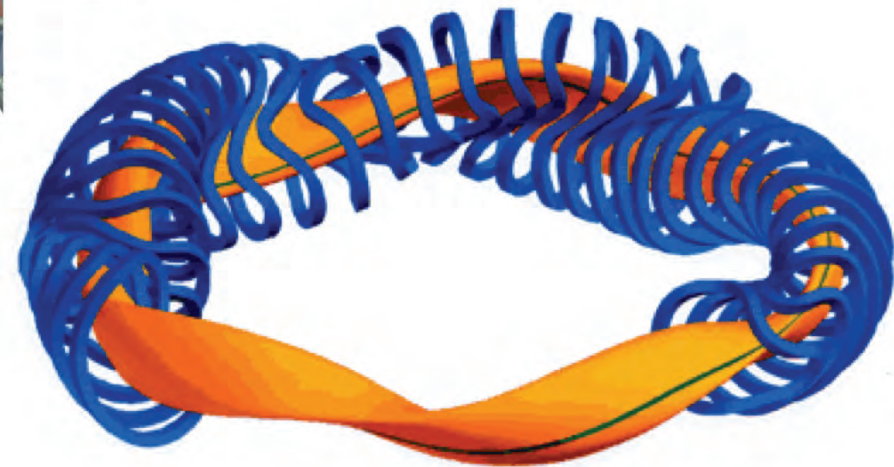
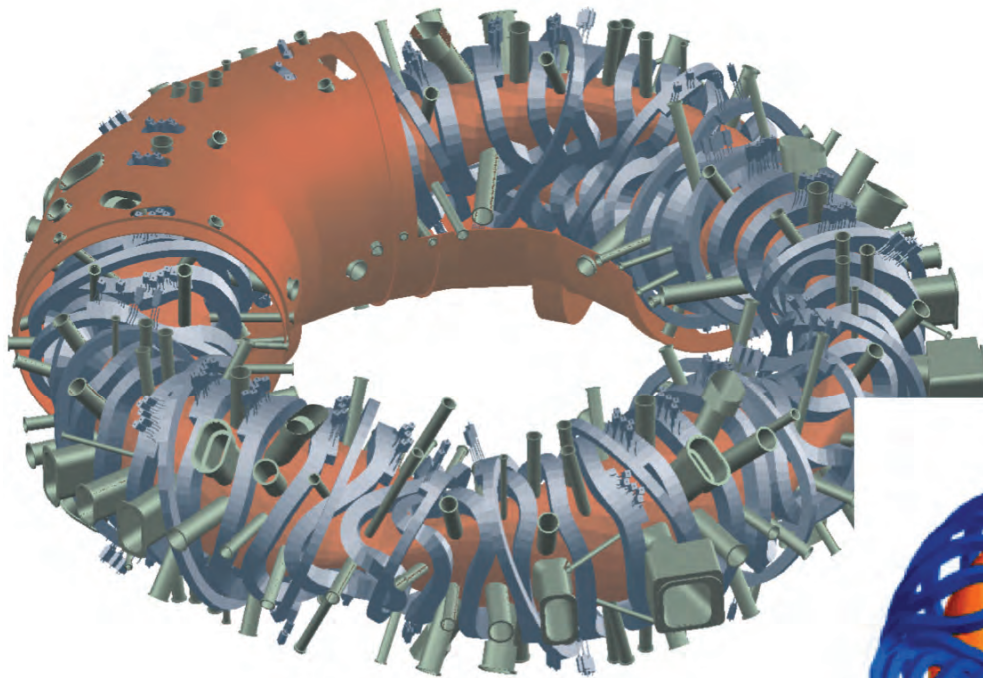
- Een tokamak bestaat essentieel uit:
 - grote transformator
 - spoelen voor het magneetveld
 - plasmaring met grote plasmastroom



Realisatie van een geschikt magneetveld: Optie 2

Stellarator

Complexe 3D spoelen creëren direkt een geschikt magneetveld

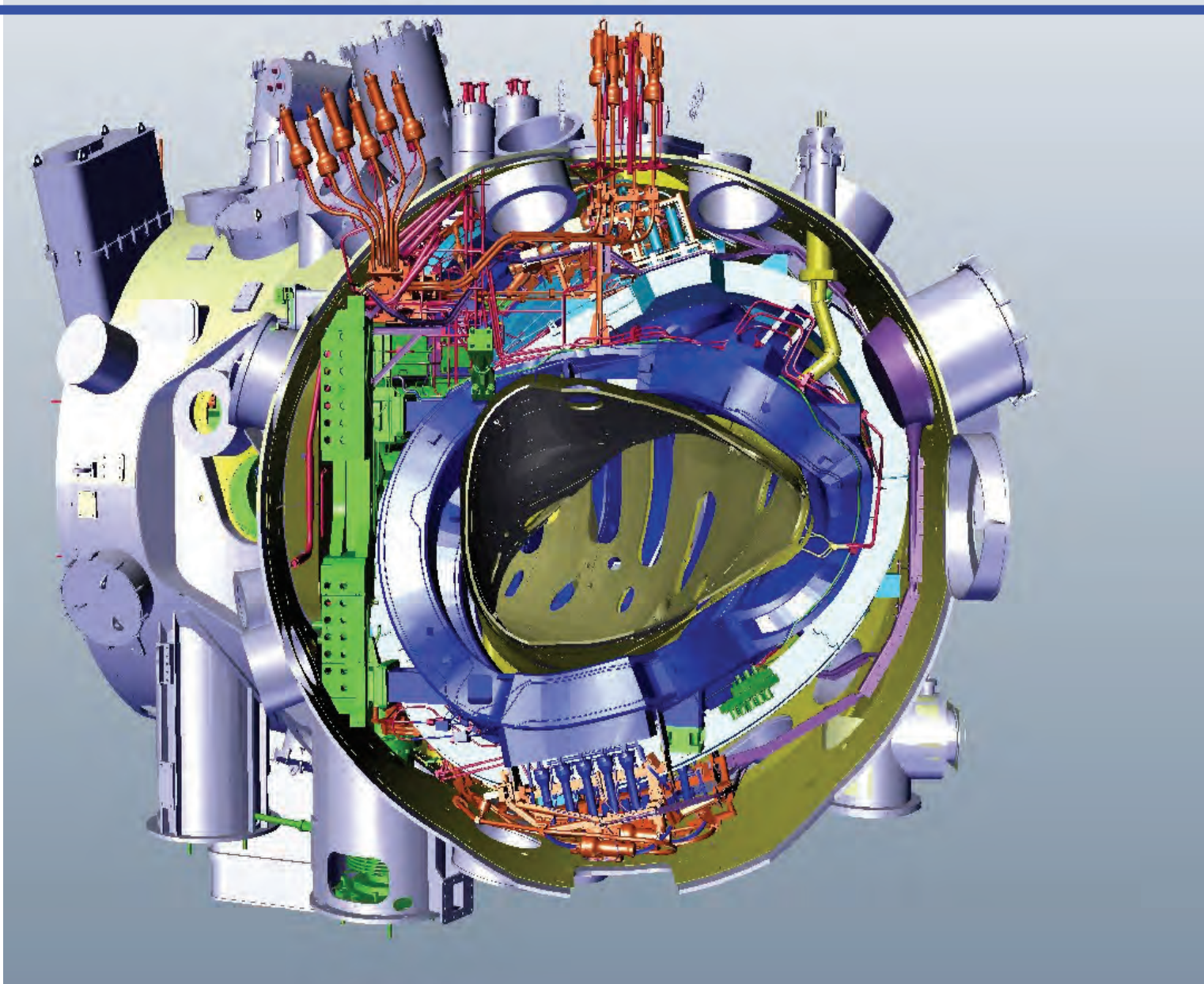


Geen plasmastroom nodig

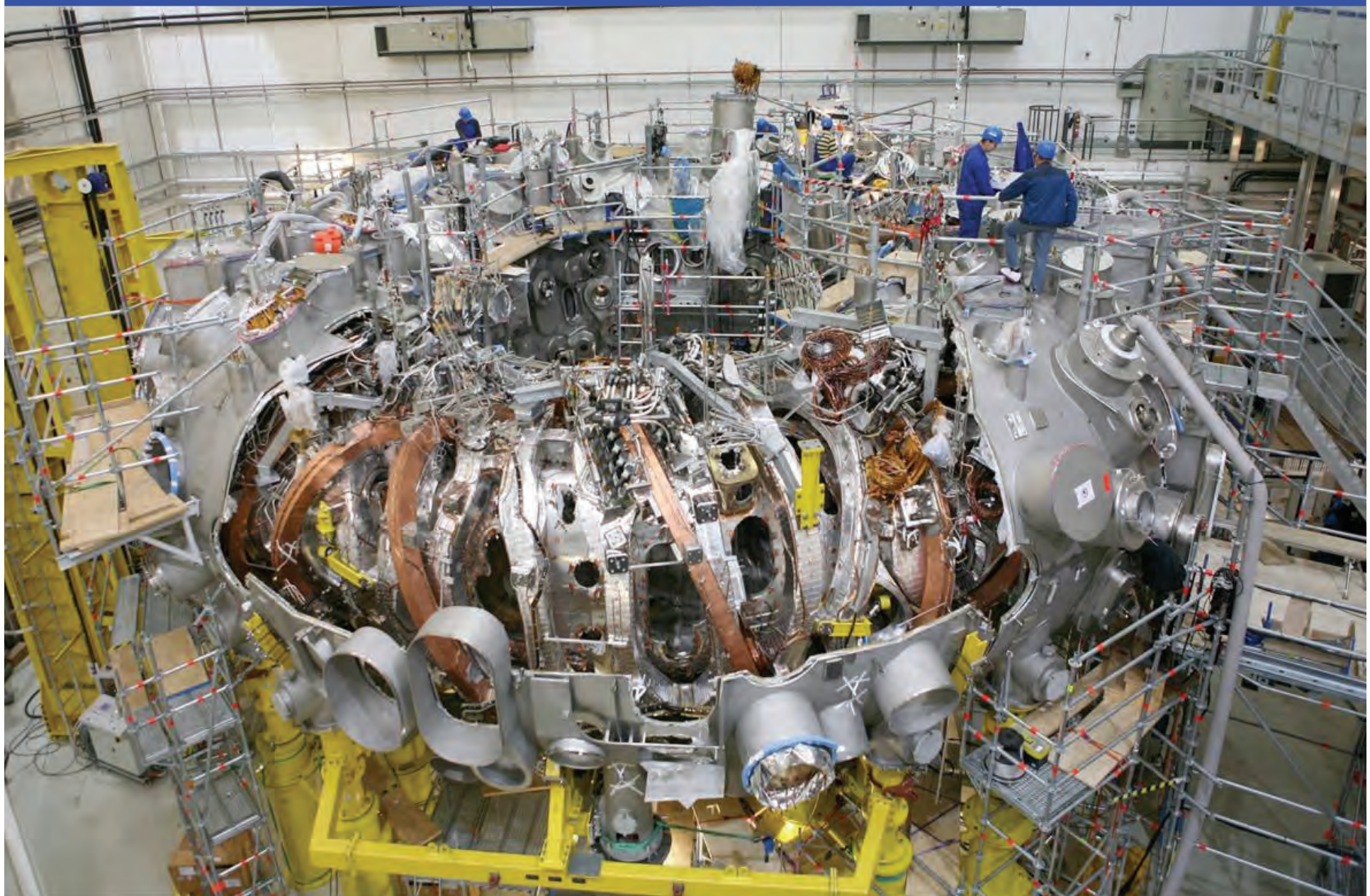
⇒ geen transformator

⇒ continu bedrijf mogelijk

Wendelstein 7-X : Grootste Stellarator ter wereld



Wendelstein 7-X : November 2011



J.Ongena

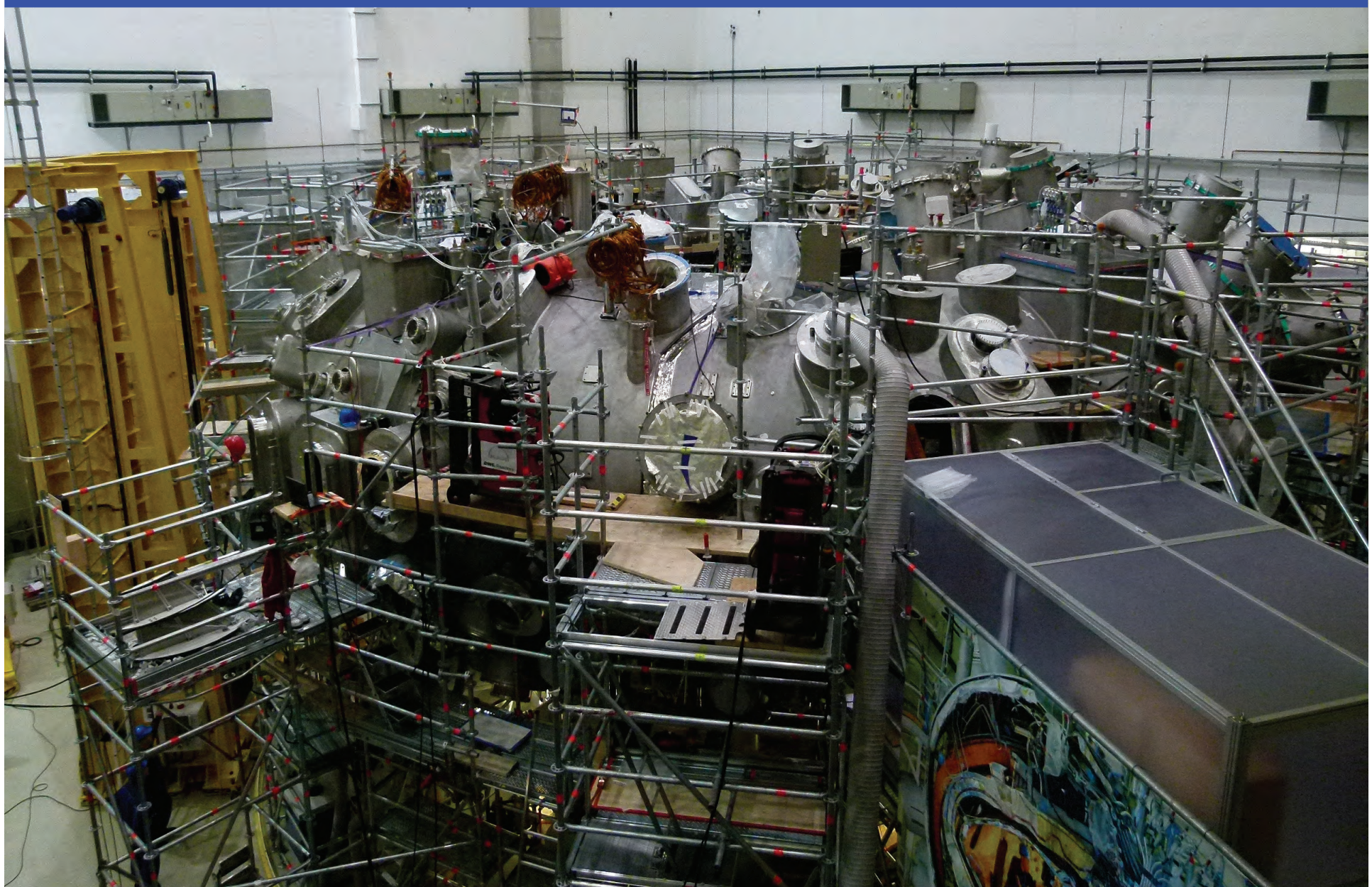
Principes van kernfusie

Universiteit Gent, 5 Maart 2015

W

Wendelstein 7-X : Januari 2013

N



J.Ongena

Principes van kernfusie

Universiteit Gent, 5 Maart 2015

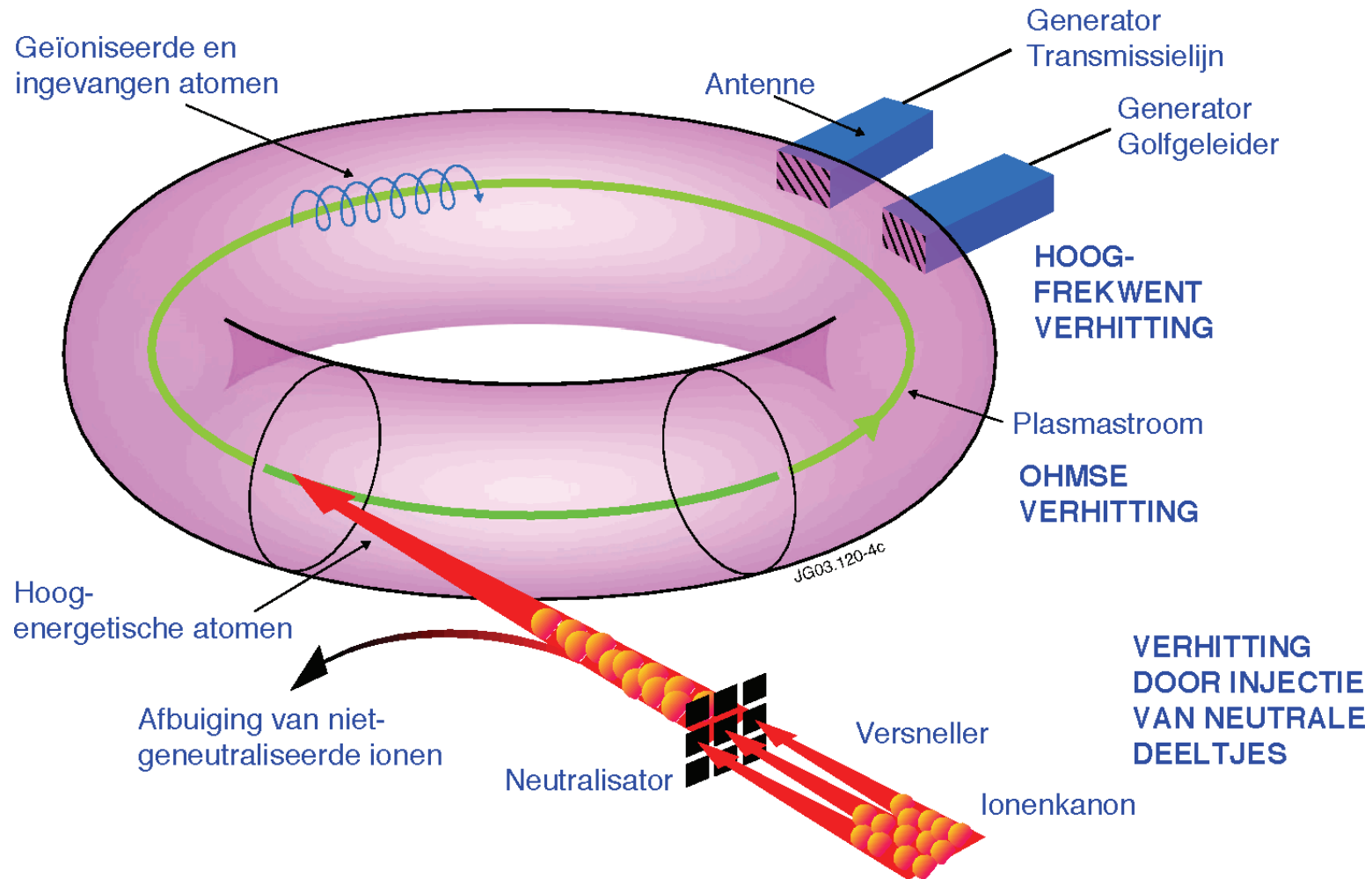
Stellarator W7-X

Vacuum- en koelingtests aan de gang
(~100K = -169 °C op dit moment)
Eerste plasma verwacht in oktober 2015

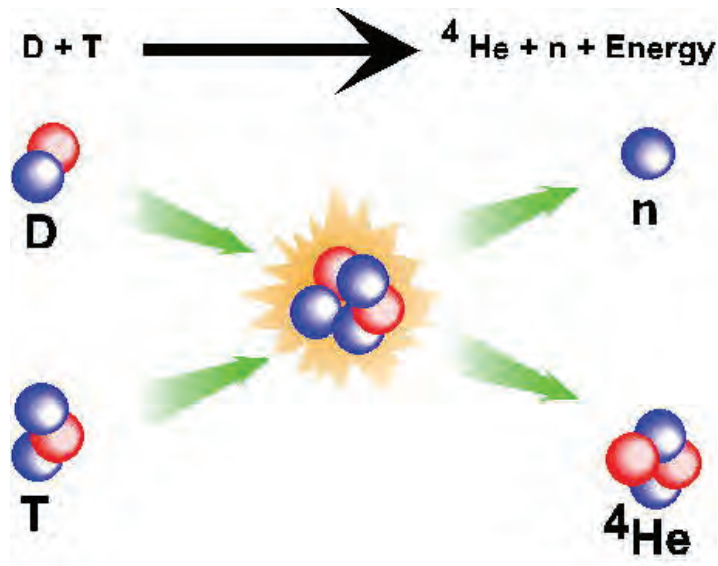


Hoe de nodige ultrahoge temperatuur realiseren?

In een toekomstige fusiereactor bijkomend:
verwarming met energetische alfadeeltjes uit de fusiereactie



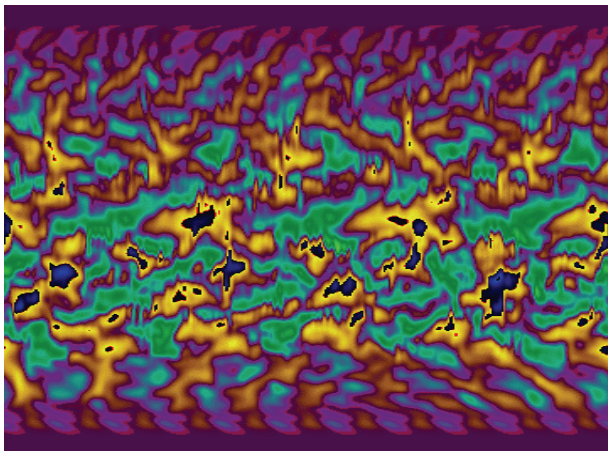
Dé moeilijkheid in kernfusie: de grote temperatuursgradiënt



- Twee positieve kernen (D^+ en T^+) op korte afstand
 - sterke afstoting
 - EXTREEM HOGE** temperaturen nodig om de kernen dicht genoeg bij mekaar te brengen : $\sim 200\ 000\ 000\ K$

- Speciale methodes zijn nodig om de brandstof te verhitten en te 'bewaren'

- Zeer grote temperatuursgradiënt ($\sim 200\ 000\ 000\ K/m$)
 - gradiënten worden beperkt door turbulenties
 - ⇒ TURBULENT medium : zeer complexe fysica**



Vermogensvermenigvuldiging Q, Break-even, Ignition

$$Q = \frac{P_{\text{fusie}}}{P_{\text{externe verhitting}}}$$

Breakeven $Q=1$

wanneer $P_{\text{fusie}} = P_{\text{externe verhitting}}$

Ontsteking $Q = \infty$

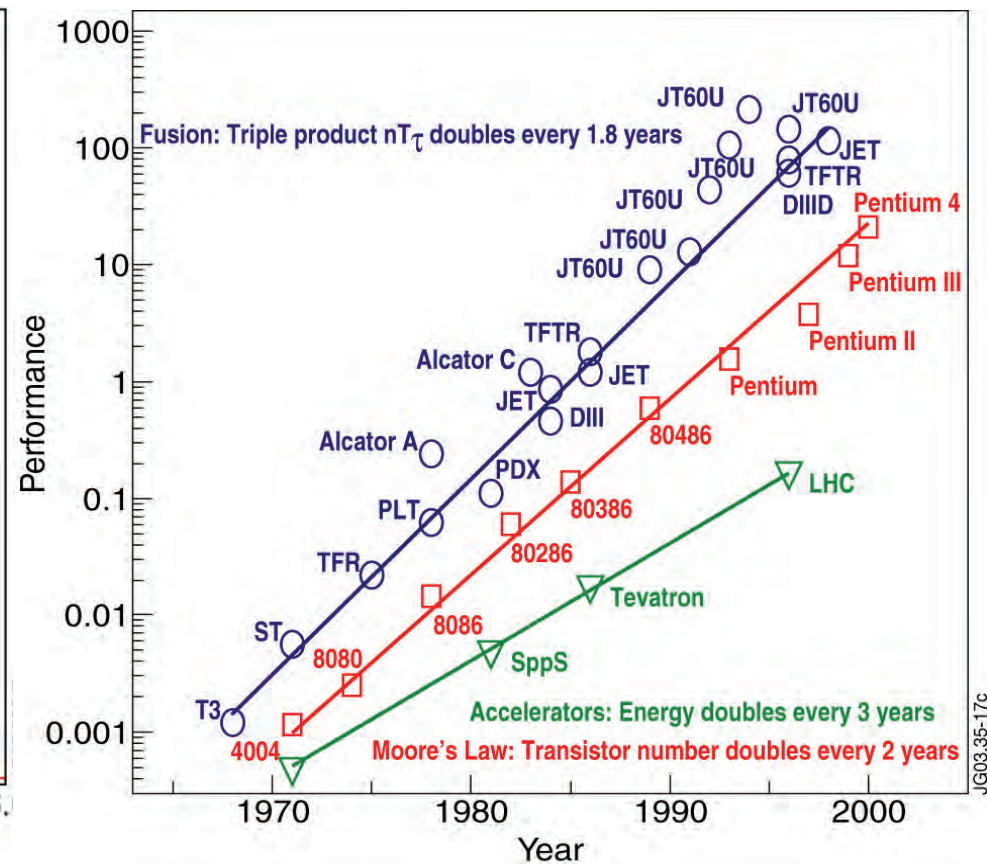
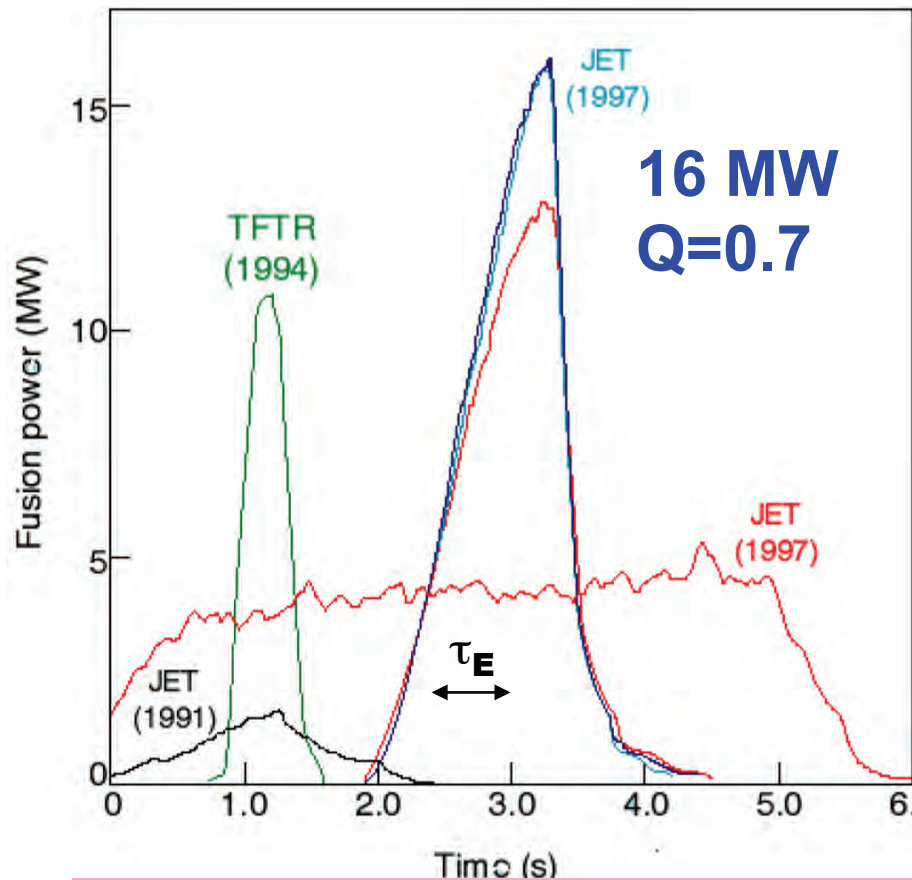
wanneer de externe verhitting kan afgeschakeld worden ($P_{\text{externe verhitting}} = 0$)
Zelfonderhoudende fusiereactie

Noteer:

Q zegt enkel iets over de vermogensbalans. Het zegt niets over het totale rendement van een fusie-experiment.

Waar staan we met het fusie-onderzoek ?

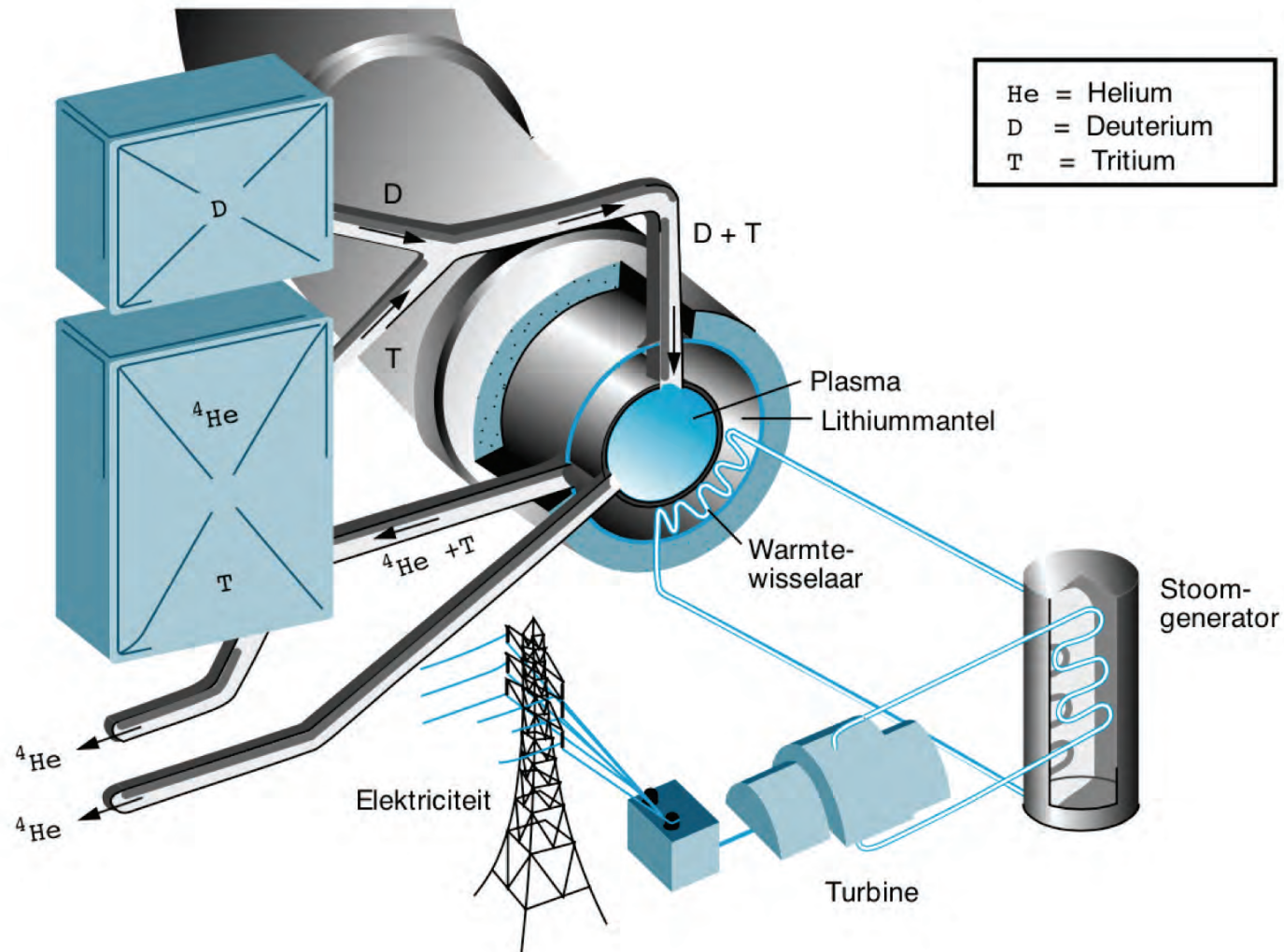
Record fusievermogen in JET 16MW (1997), $Q \sim 0.7$, praktisch break-even



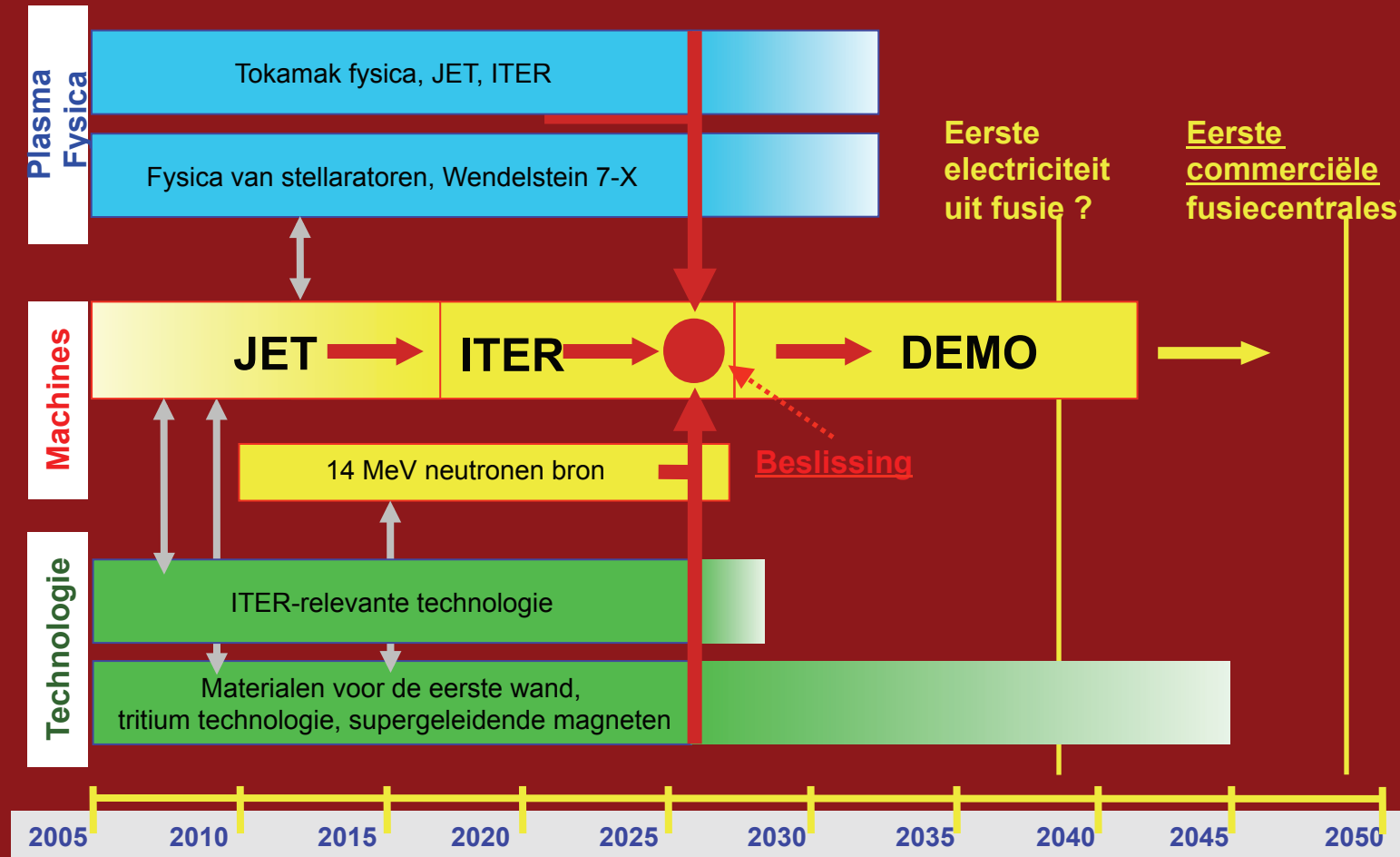
De evolutie van de opbrengst van fusie-experimenten is zelfs beter dan de 'explosieve' toename van de rekenkracht van computerchips

Een toekomstige fusiecentrale

Zoals een conventionele centrale maar met een andere 'oven'



'Roadmap' voor het onderzoek in magnetische fusie



Joint European Torus (JET) Grootste tokamak ter wereld

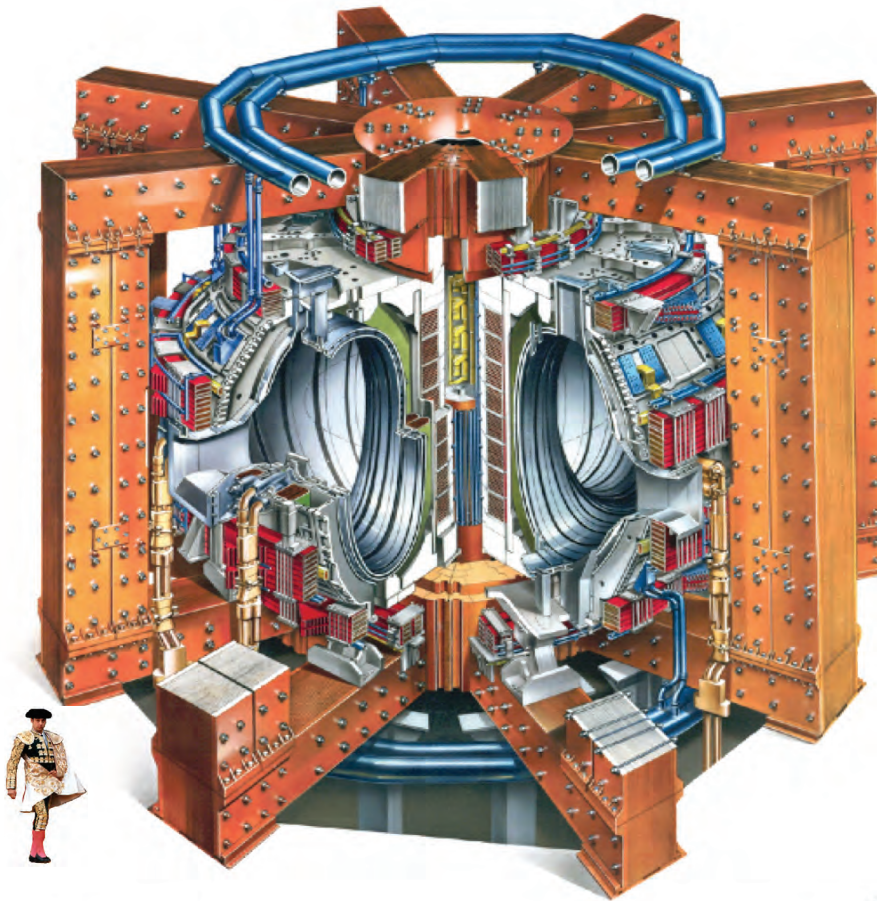
(in Culham, op 10km van Oxford)



www.jet.efda.org

Joint European Torus (JET)

Gemeenschappelijke Europese Fusiemachine (Oxfordshire, UK) Grootste tokamak ter wereld



Vacuümvat

3.96m x 2.4m

Plasmavolume

80 m³ - 100 m³

Plasmastroom

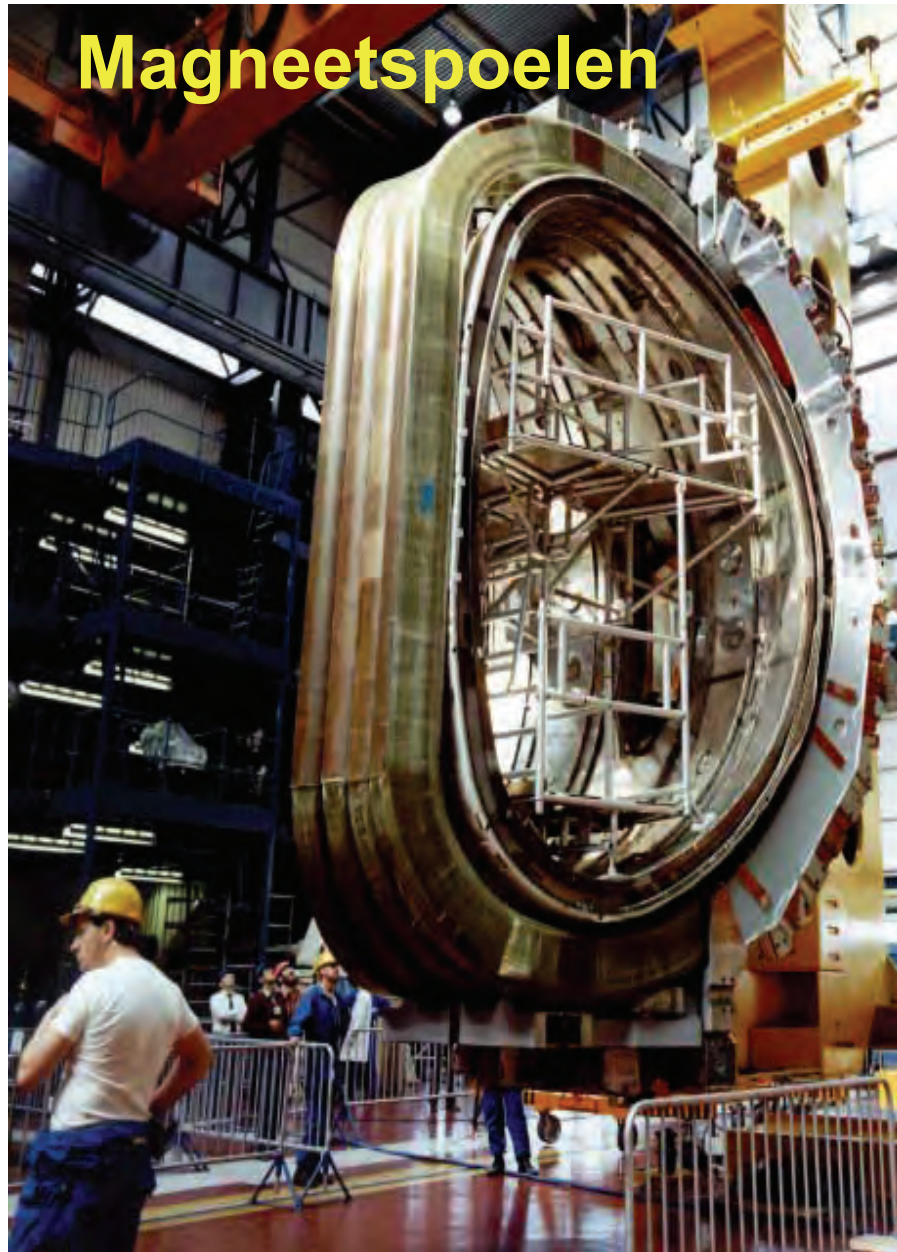
max. 5 MA

in huidige (divertor) configuratie

Toroïdaal magneetveld: max. ~4 Tesla

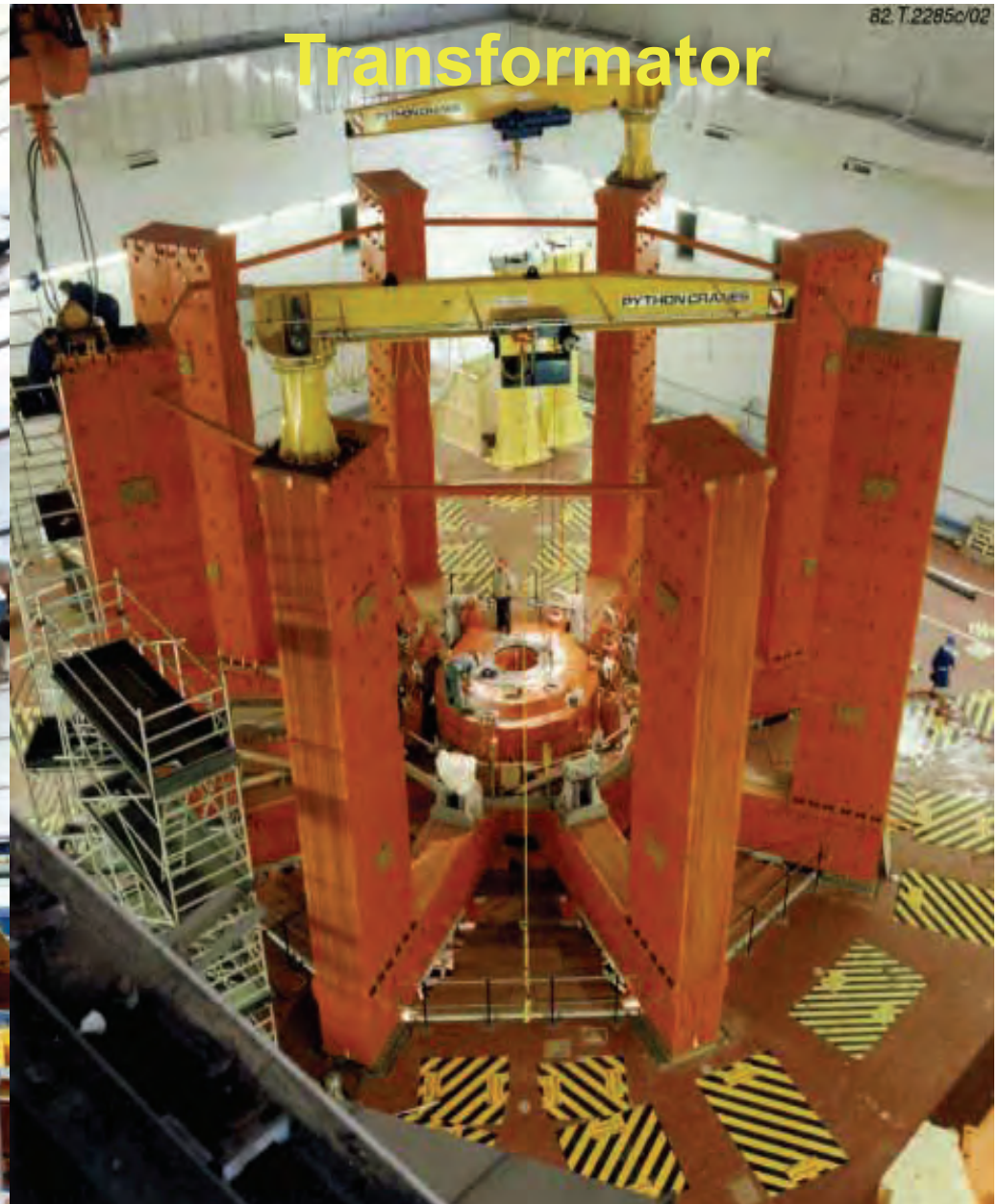
82.348c

Constructie van JET (1983)



Magneetspoelen

J.Ongena

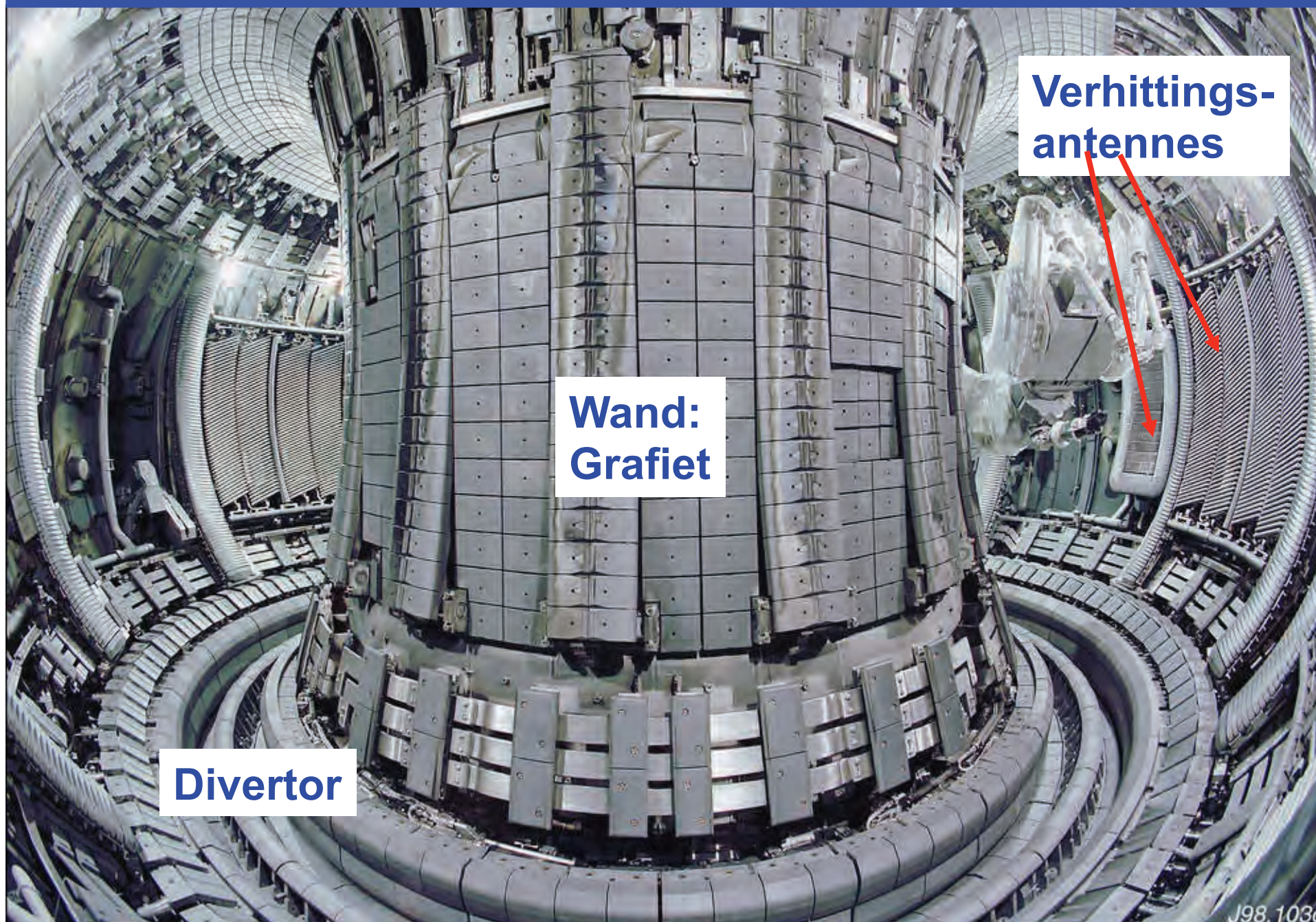


Transformator

Principes van kernfusie

Universiteit Gent, 5 Maart 2015

Binnenzicht van JET met grafietwand (tot 2010)

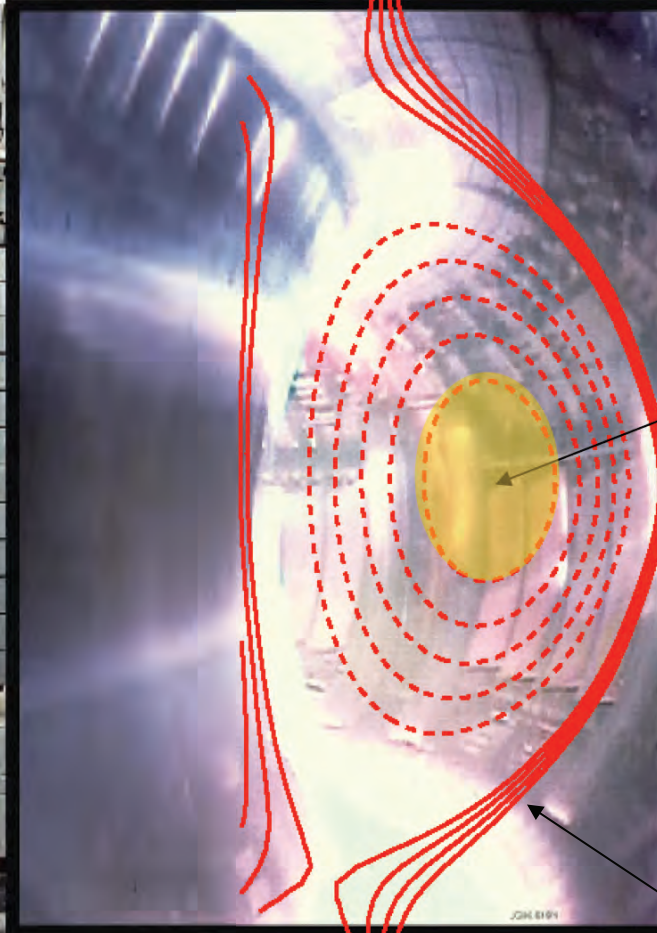
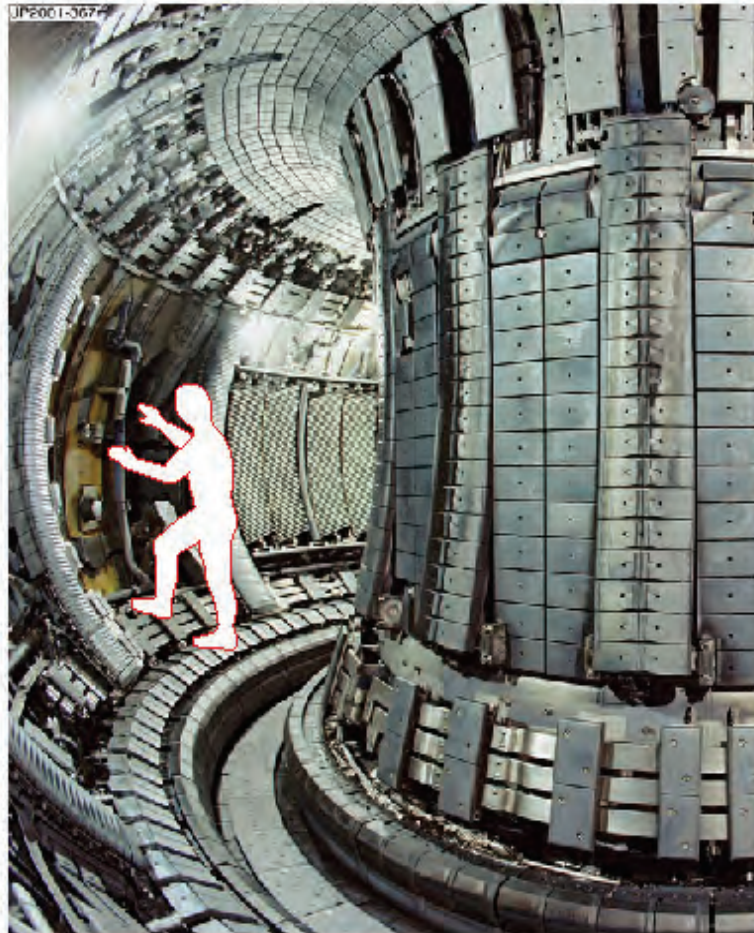


**Verhittings-
antennes**

**Wand:
Grafiet**

Divertor

Binnenzicht van JET met en zonder heet plasma

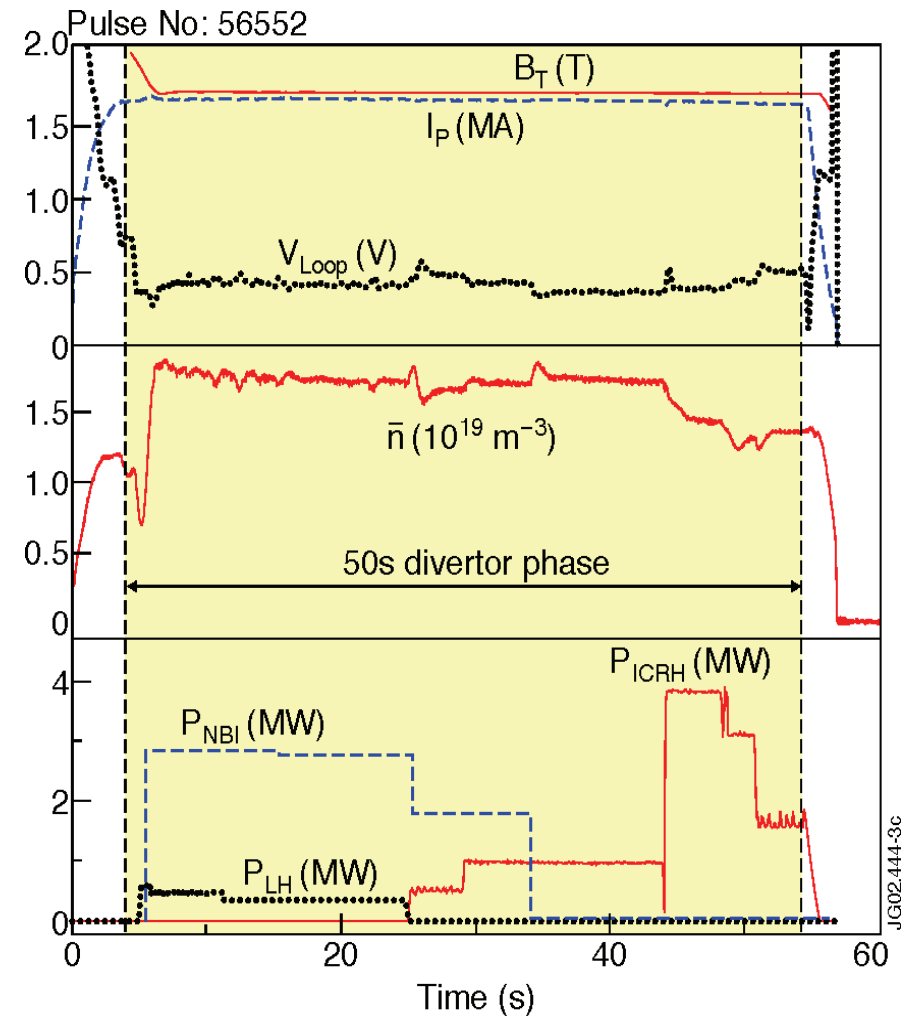
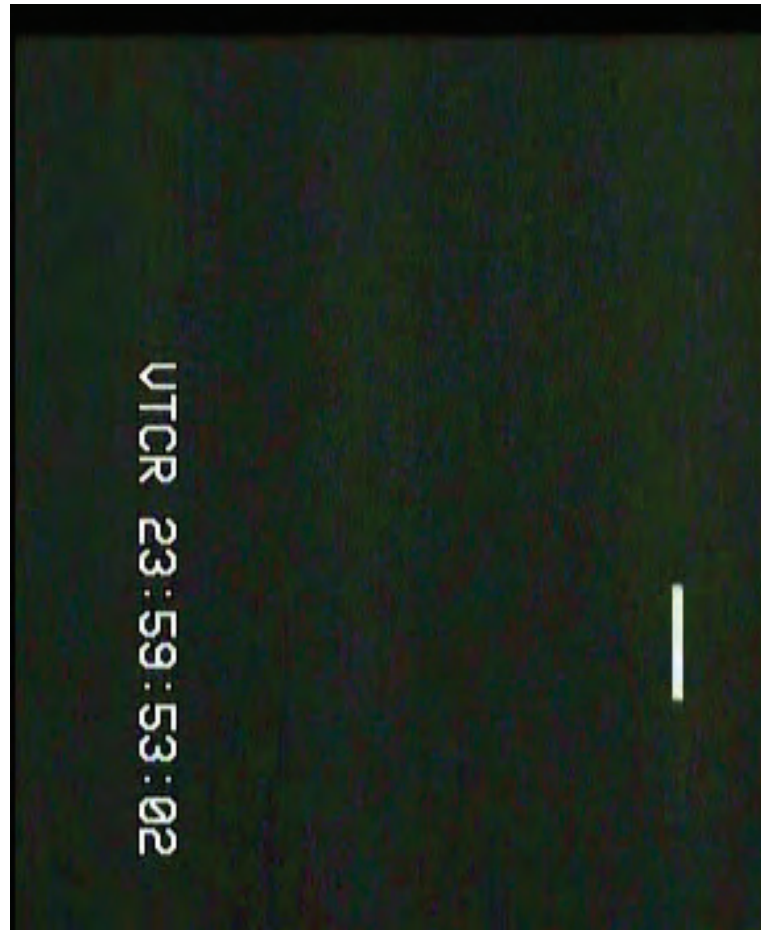


200 000 000 C

Magnetische oppervlakken

; 5 Maart 2015

Voorbeeld van een experiment in JET



Ook : Tore Supra (Frankrijk): 6min30s, LHD (Japan): 30min

De nieuwe metalen wand (W,Be) in JET– 8 Mei 2011



Van JET naar ITER



china eu india japan korea russia usa

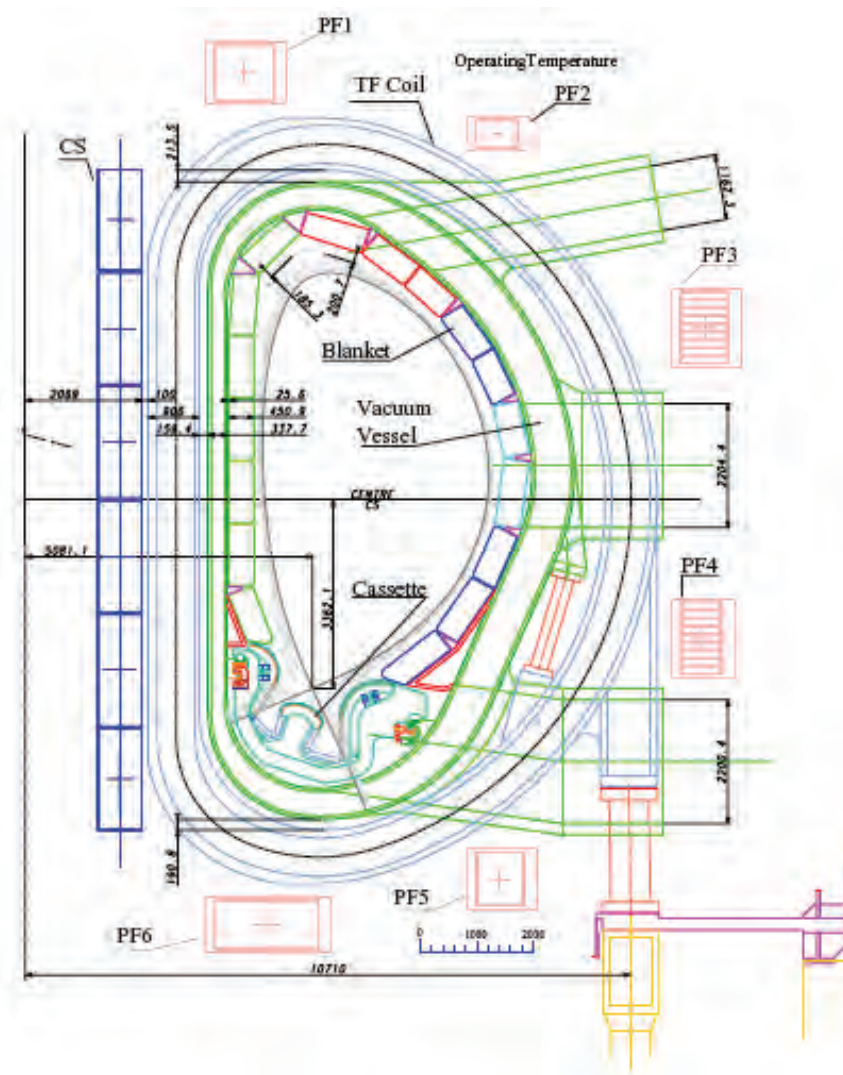


***ITER = International Thermonuclear Experimental Reactor**

Doelstellingen van ITER

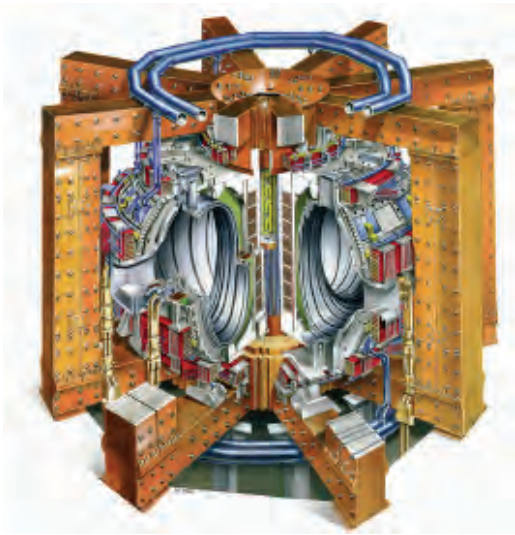
- Doelstelling van het ITER project:
 - de wetenschappelijke en technologische mogelijkheid van fusie aantonen voor vreedzame toepassingen
 - Een machine te ontwerpen, bouwen en exploiteren die dit kan aantonen
- ITER is een tokamak experiment (geen commerciële reactor) met volgende doelstellingen:
 - ✓ $P_{\text{fusie}} = 500 \text{ MW}$ met $Q \geq 10$ voor 300-500 s
 - ✓ $P_{\text{fusion}} \geq 350 \text{ MW}$ met $Q \geq 5$ voor 1000-3000 s
 - ✓ Mogelijks ook “gecontroleerde ontsteking” ($Q \geq 30?$)
- ITER is een **unieke samenwerking op wereldschaal** tussen de EU (plus Zwitserland), China, India, Japan, Russische Federatie, Zuid-Korea en de Verenigde Staten

ITER Ontwerp Parameters



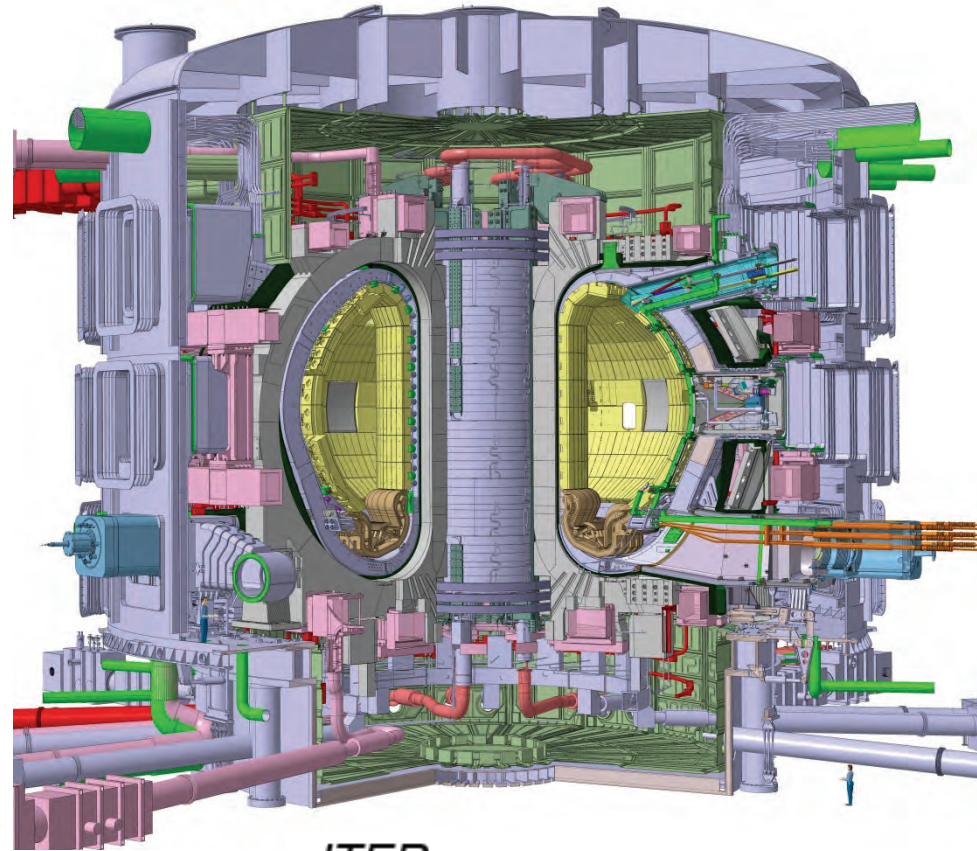
R/a:	6.2 m / 2 m
Volume:	830 m ³
Plasma Stroom:	15 MA
Toroïdaal veld:	5.3 T
Fusievermogen:	500 MW
Q-waarde:	10 (30?)
Pulsduur	300 - 500 s
("Steady-state")	~3000 s

ITER: schaalfactor 2 ten opzichte van JET



JET

$V_{\text{plasma}} \quad 80 \text{ m}^3$
 $P_{\text{fusion}} \quad \sim 16 \text{ MW } 2\text{s}$
 $t_{\text{plasma}} \quad \sim 30 \text{ s}$

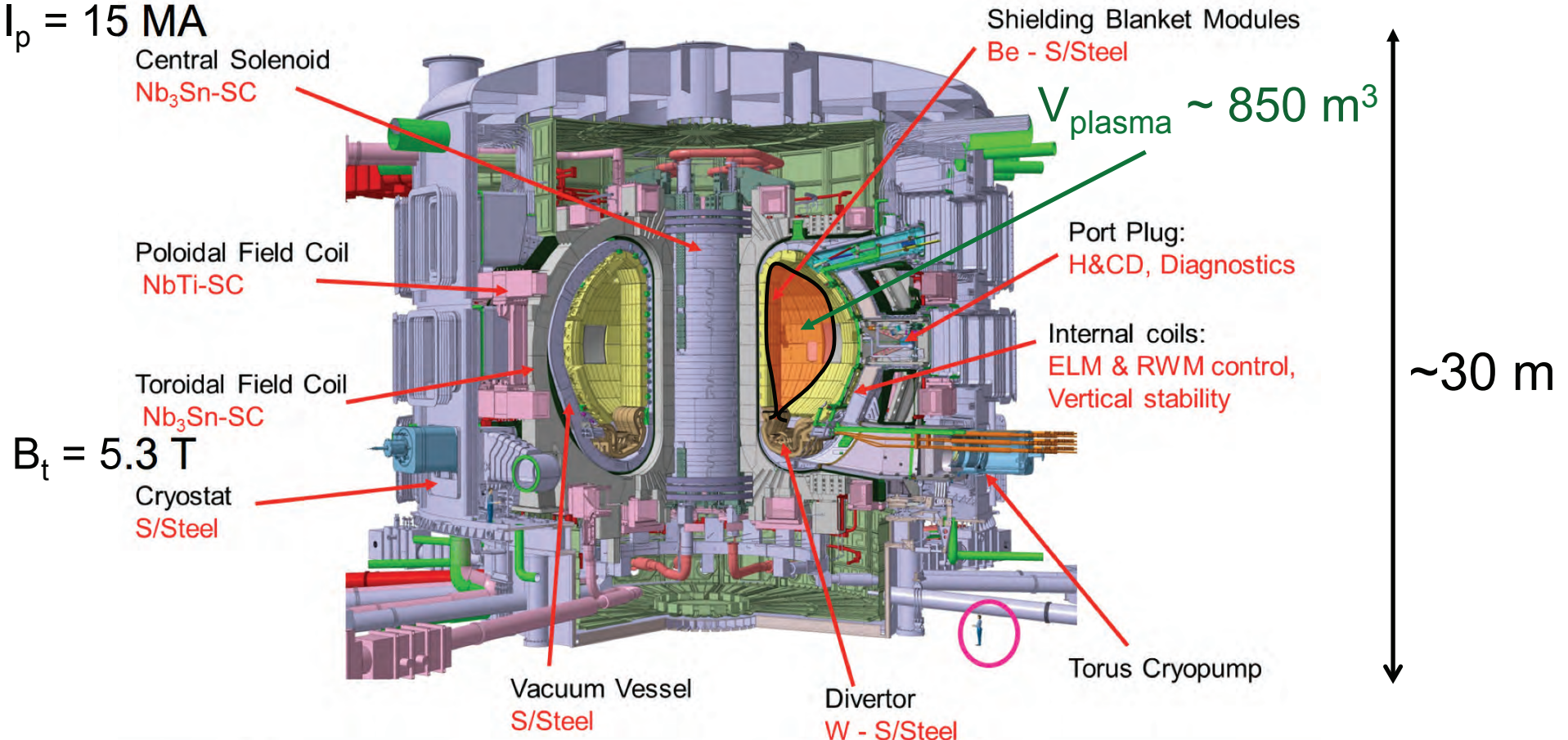


ITER

$V_{\text{plasma}} \quad 830 \text{ m}^3$
 $P_{\text{fusion}} \quad \sim 500 \text{ MW } 500\text{s}$
 $t_{\text{plasma}} \quad \sim 400 \text{ s}$

ITER – Belangrijkste Componenten

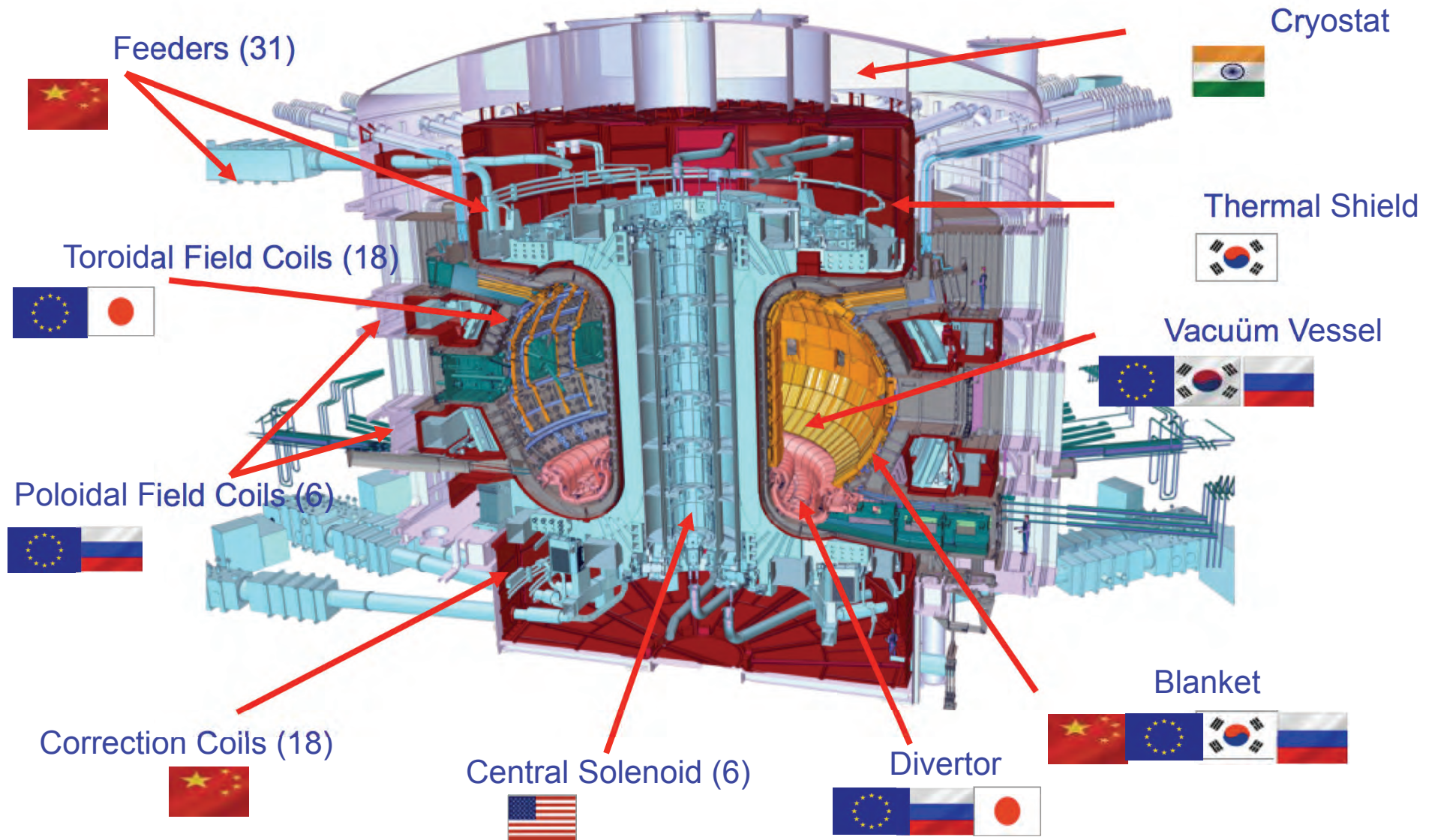
$I_p = 15 \text{ MA}$



$B_t = 5.3 \text{ T}$

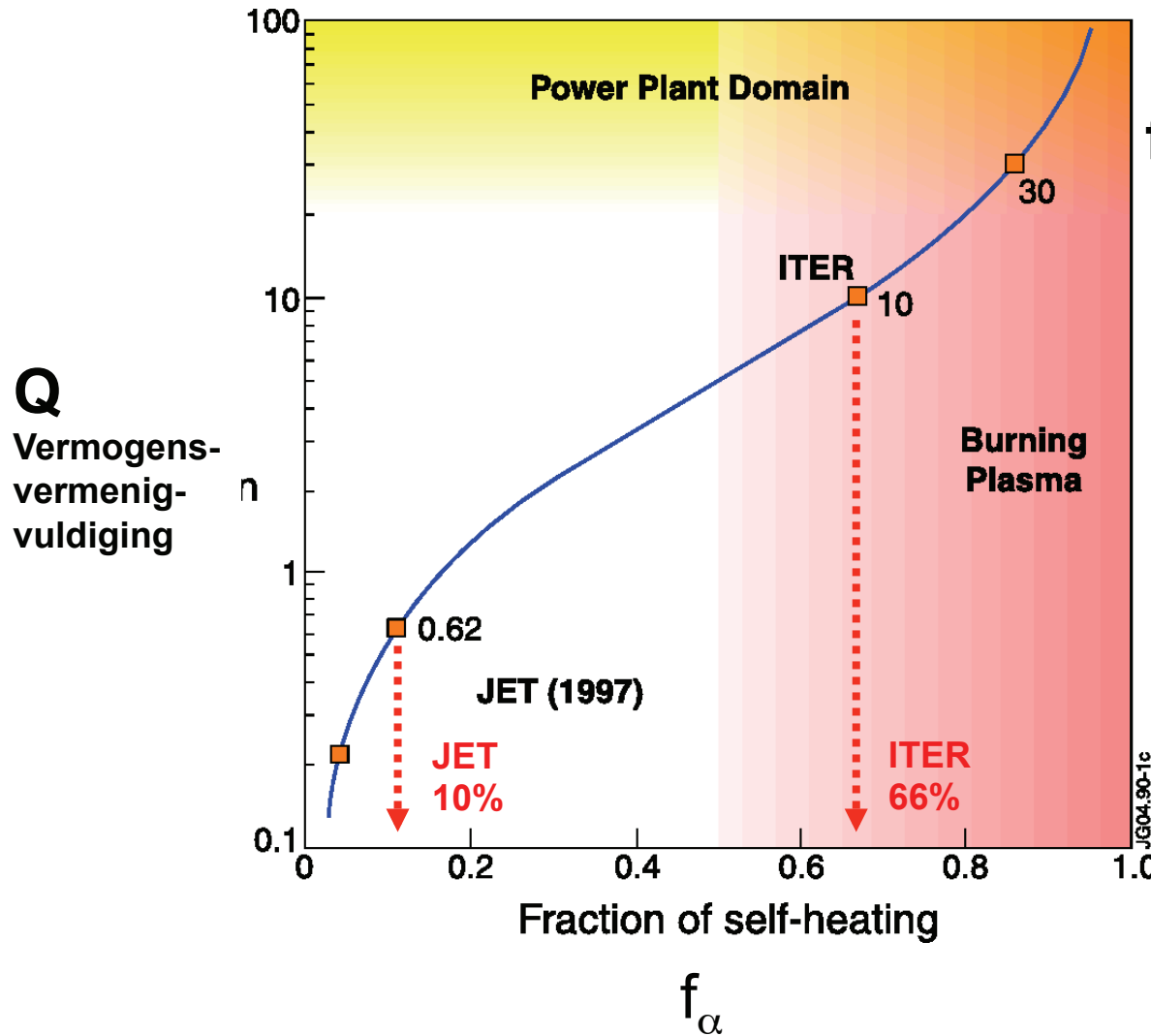
NBI (1 MeV)	ECH (170 GHz)	ICH (40-55 MHz)	LH (5 GHz)	Totaal
33 MW (+16.5 MW)	20 MW (20 MW)	20 MW (20 MW)	0 MW (20 MW)	73 MW (130 MW-110 MW tegelijkertijd)

Constructie van ITER – Partners



ITER is zeer belangrijk voor verdere vooruitgang in fusie

Studie van het gedrag van alfa deeltjes (as van de fusiereactie)



$$f_{\alpha} = \frac{\text{zelfverhitting}}{\text{externe verhitting}}$$

$$f_{\alpha} = \frac{Q}{Q + 5}$$

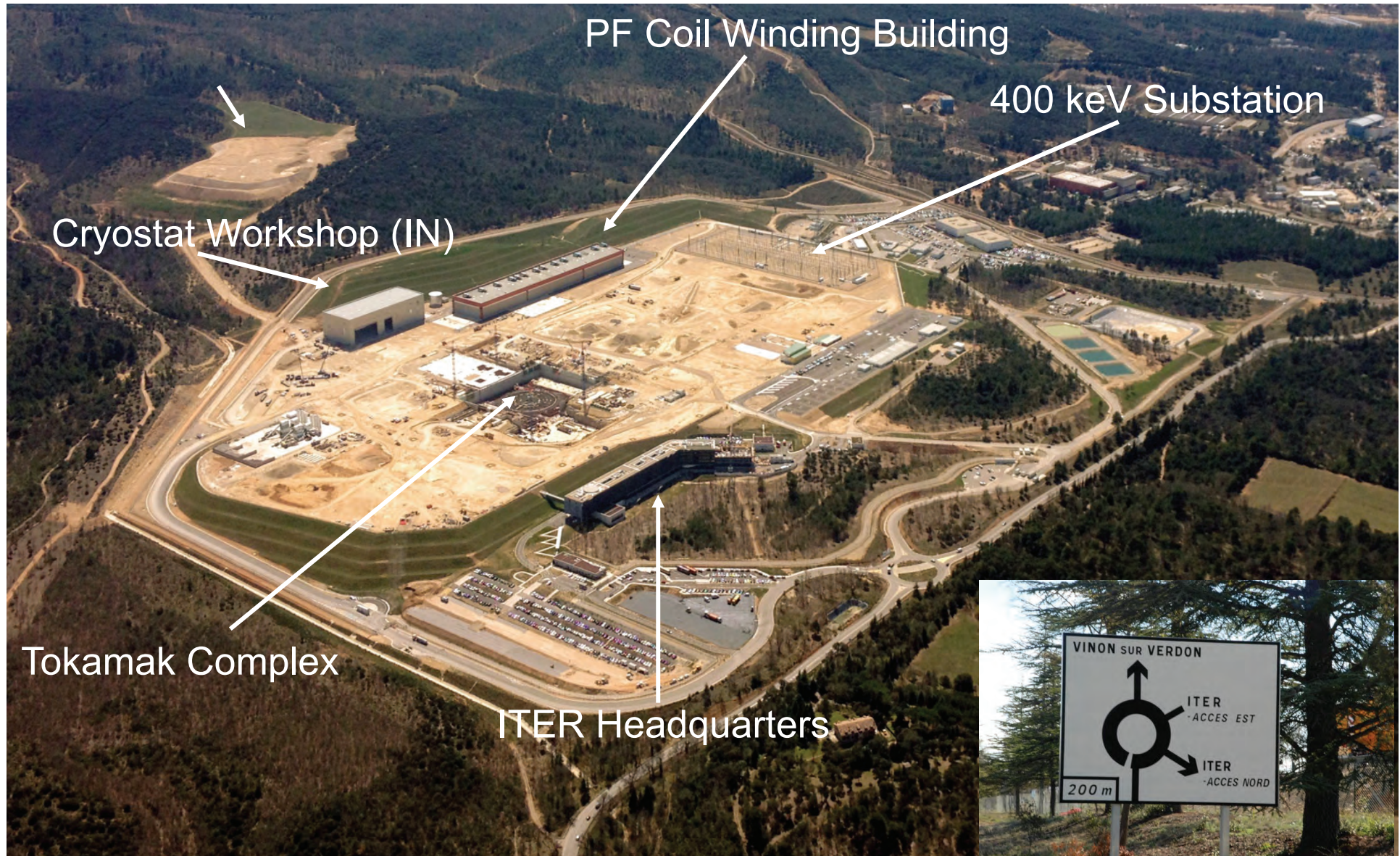
JET

$$Q \leq 1 \rightarrow f_{\alpha} \leq 16\%$$

ITER :

$$Q \geq 10 \rightarrow f_{\alpha} \geq 66\%$$

Overzicht van de ITER site



Overzicht van de ITER site



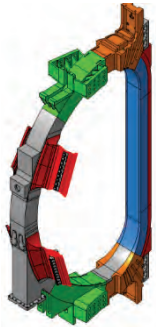
De grondplaat (400.000 ton) is klaar.
De rest van het gebouw kan nu volgen



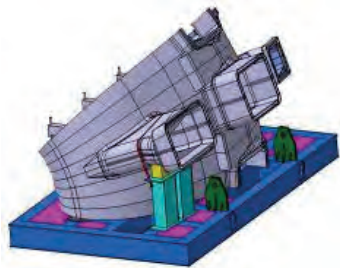
April, French Nuclear Safety
Authority (ASN) inspectie

Transport van zware ITER componenten getest

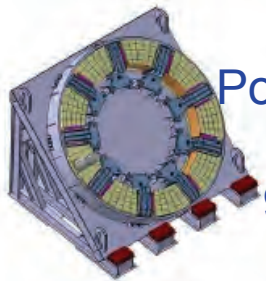
FRANCE



Magneetspoel ~360 t
16 m Tall x 9 m Wide



Vacuümvat Sector ~400 t
12 m Tall x 9 m Wide

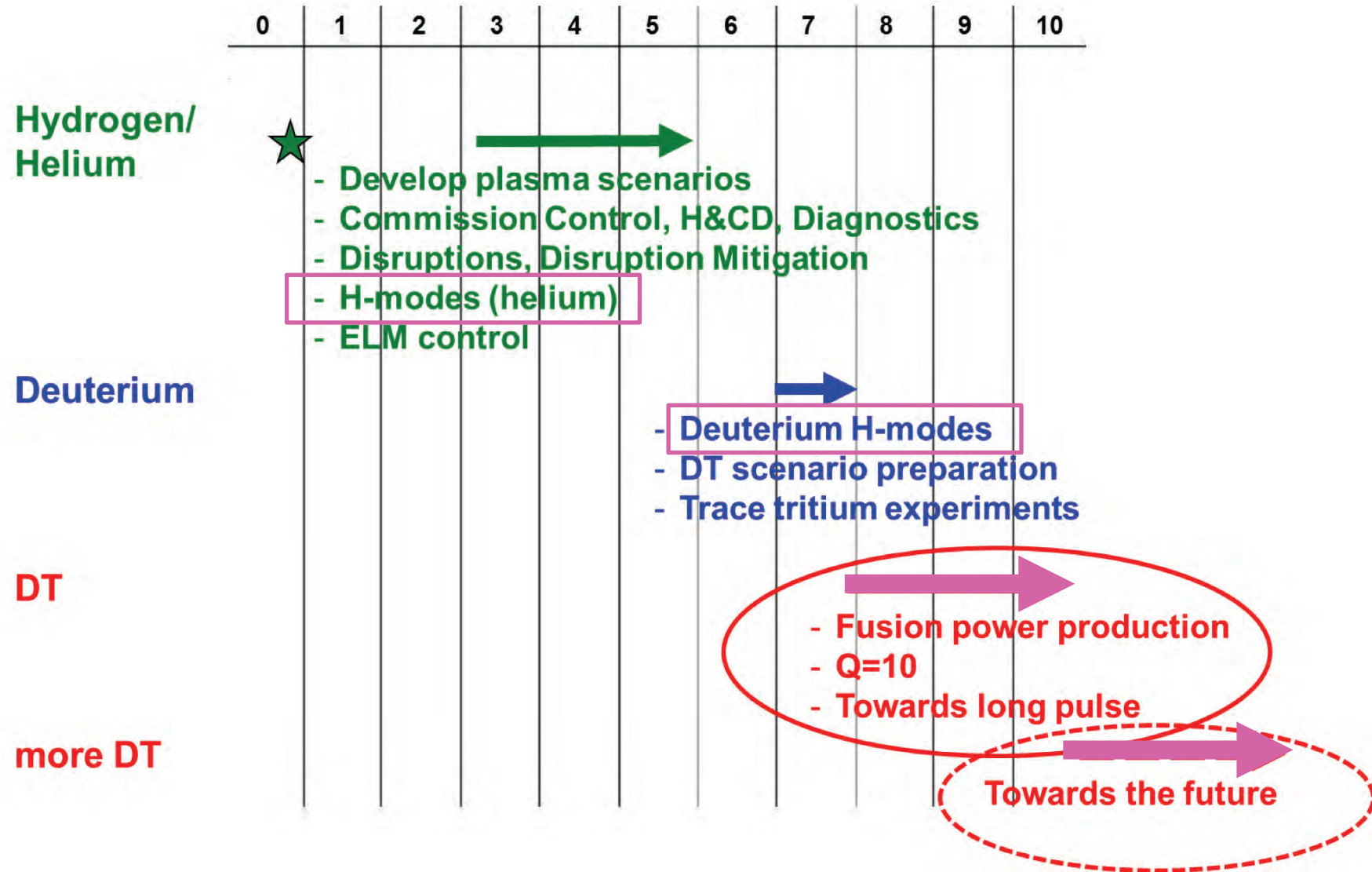


Poloïdale Veldspoel
1 Coil ~200 t
9.4 m Diameter

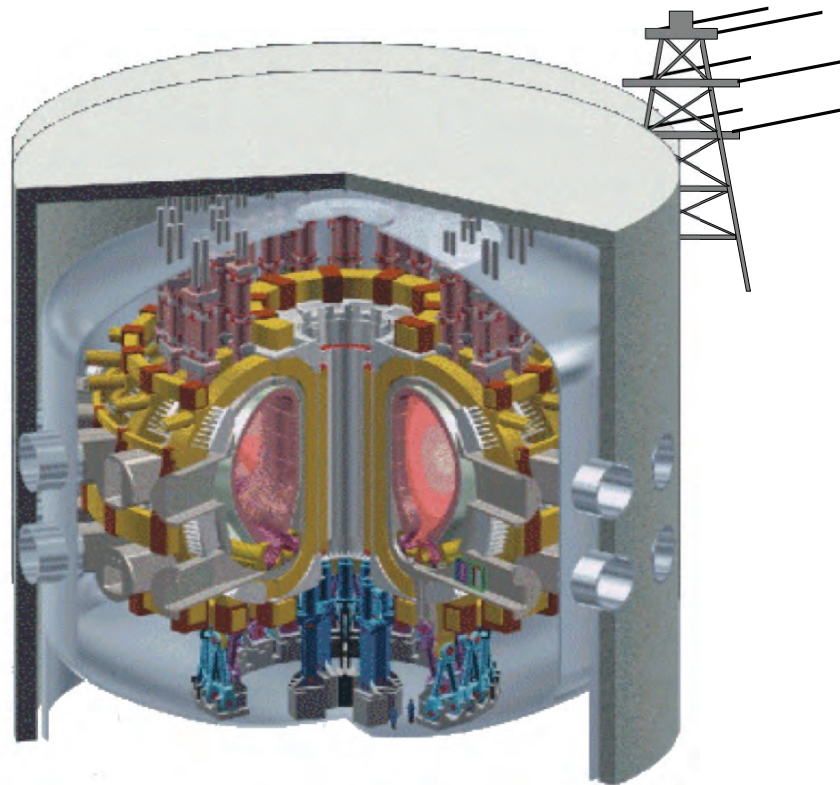


Test transport met succes afgerond
(16 – 20 September 2013)

ITER Onderzoeksplan



Onderzoek en ontwikkeling voor ITER en DEMO



Een aantal belangrijke verschillen tussen ITER en DEMO

ITER	DEMO
Experimentele machine	~ Commerciële machine
400s - 3000s pulsduur	Zeer lange pulsen / continue operatie ?
Veel diagnostieken	Gereduceerde set diagnostieken
Geen T bereiding vereist	Zelfvoorzienende Tritium bereiding
Roestvrij staal (316 SS)	Materiaal met gereduceerde activatie
Kleine n-flux, dpa	Hoge n-flux, hoge dpa

Nog altijd een grote stap van ITER naar DEMO !

Mogelijke DEMO parameters

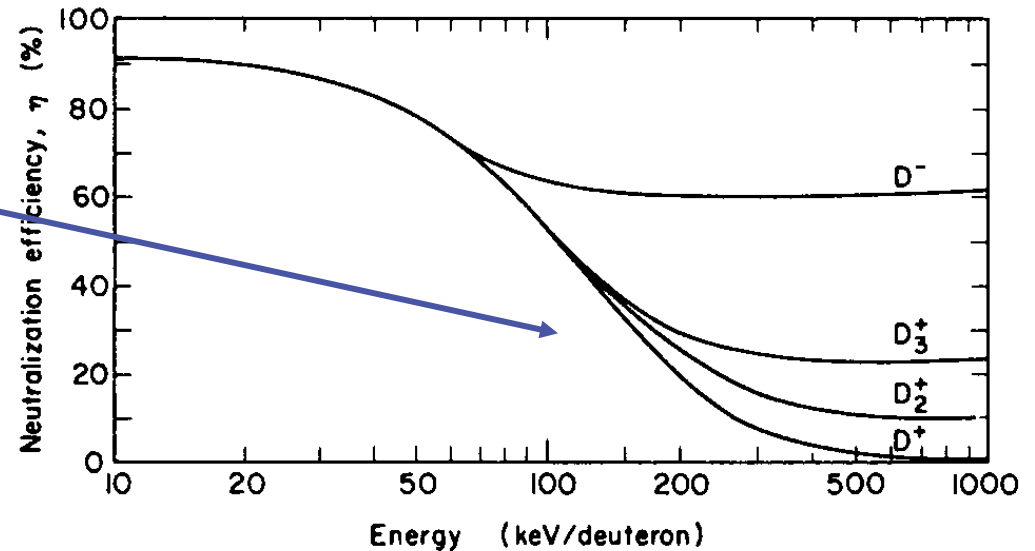
Gepulste versie Constructie binnen “20 jaar”?

	DEMO 1	ITER / ITER-98
P_{th} (MW)	2200	500 / 1500
P_{net} (MW)	500	-
P_{rec} (MW)	385	-
R_0 (m)	9.0	6.2 / 8.14
a (m)	2.5	2.0 / 2.8
B_t (T)	6.5	5.3 / 5.68
I_p (MA)	16.8	15 / 21
f_{BS}	36%	-
P_{aux} (MW)	50	70 / >100
H_{98}	1.0	1
β_N ($\beta_{N,th}$)	2.5 (2.2)	2

DEMO / ITER R&D - 1
Verhittingssystemen: Injectie met neutrale deeltjesbundels

Fysica van verhitting met neutrale bundels

- Huidige ionenbronnen produceren voornamelijk D^+ , D_2^+ , D_3^+
- Neutralisatie efficiëntie voor positieve ionen is zeer slecht bij hoge energieën
- In operatie nu: max. 150kV (JET) (penetratiediepte ~ 1 m in plasmas met hoge dichtheid)



Voltage nodig voor het bereiken van het centrum van plasmas

FIG.2. Maximum neutralization efficiency in D_2 vs beam energy, for each of the four beams, D^+ , D_2^+ , D_3^+ , and D^- .

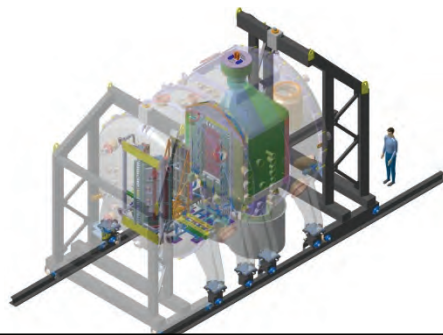
[Berkner K.H., et al., Nuc. Fus. 15(1975)249-154.]

- In ITER : ~ 1 MeV / in DEMO nog hoger : $\sim 1.5 - 2$ MeV?
- Enkel efficiënt wanneer NEGATIEVE ionen worden versneld.

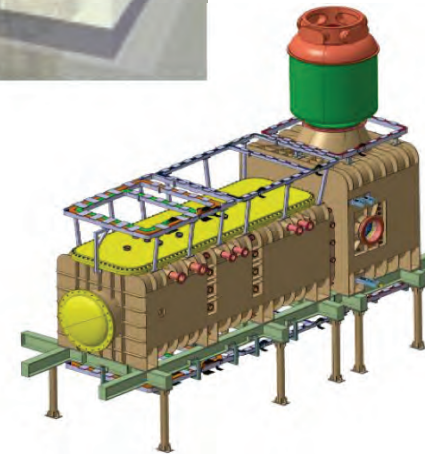
DEZE TECHNOLOGIE VEREIST NOG VEEL R&D

Negatieve ionen technologie: Nieuw labo in Padua

PRIMA Padova Research on ITER Megavolt Accelerator



SPIDER Source for Production of Ion of Deuterium Extracted from Rf plasma



MITICA Megavolt ITER Injector & Concept Advancement

PRIMA lab (SPIDER EN MITICA) in Padua (Augustus 2013)

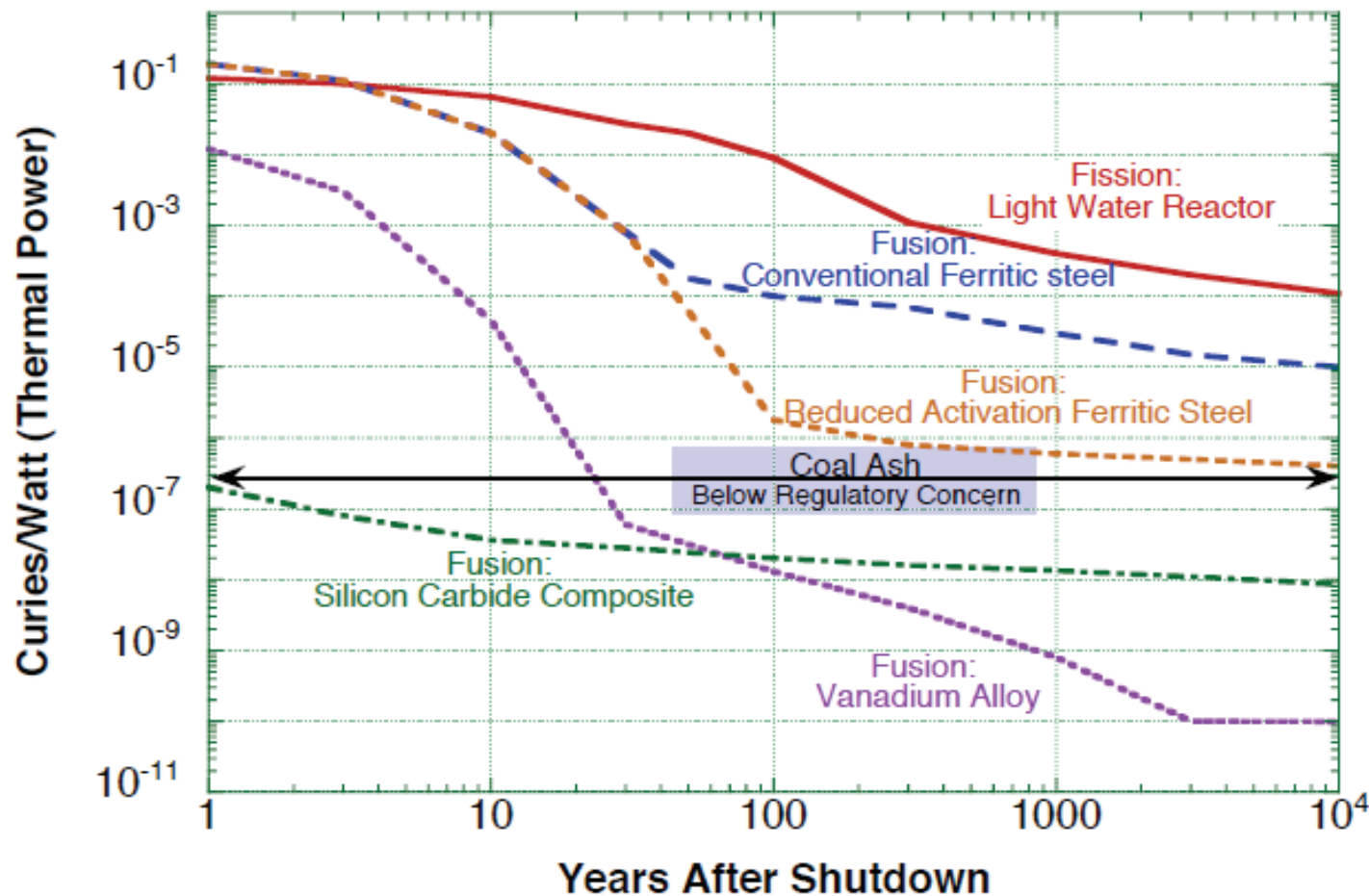


DEMO R&D - 2
Onderzoek naar materiaal voor de eerste wand

DEMO Structurele Materialen: 'Hands on' na ~ 100 jaar?

DEMO: Geavanceerd staal ? Vanadiumlegeringen? SiC ? ...?

Comparison of Fission and Fusion Radioactivity after Shutdown



Materiaalonderzoek nodig voor toekomstige fusiereactors

- ITER: < 2 'displacements per atom' (dpa)
(aan het 'levenseinde' van de machine)
- Fusiecentrale ~150 dpa (na ~ 5 jaar)
- Transmutatie van Fe → ontstaan van protonen of heliumkernen in de matrix van het materiaal, door volgende reacties:



→ Opzwellling en bros worden van het materiaal minimaliseren

Hoe kan men interactie met 14,1 MeV neutronen bestuderen?

Bestaande neutronenbronnen zijn niet geschikt....

1. Splitsingsreactors

- gemiddelde neutronen energy ~2 MeV
- *Geen efficiënte generatie van protonen of heliumkernen*

2. Spallatie

- breed energiespectrum voor de neutronen ~ honderden MeV
- *Veel te hoge neutron energie*

3. Ionimplantatie

- *Te klein volume en te weinig 'displacements per atom' (dpa)*

Een nieuw laboratorium is nodig:

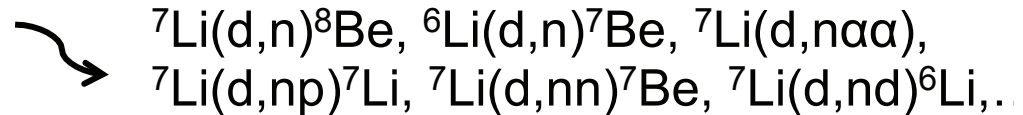
International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)

IFMIF – International Fusion Materials Irradiation Facility

Invloed van 14,1 MeV neutronen op structurele componenten

IFMIF

- 40 MeV D⁺ op 25mm vloeibaar Li (2x 5MW, 125 mA accelerator)
- Neutronen uit ^{nat}Li(d,xn) reacties:

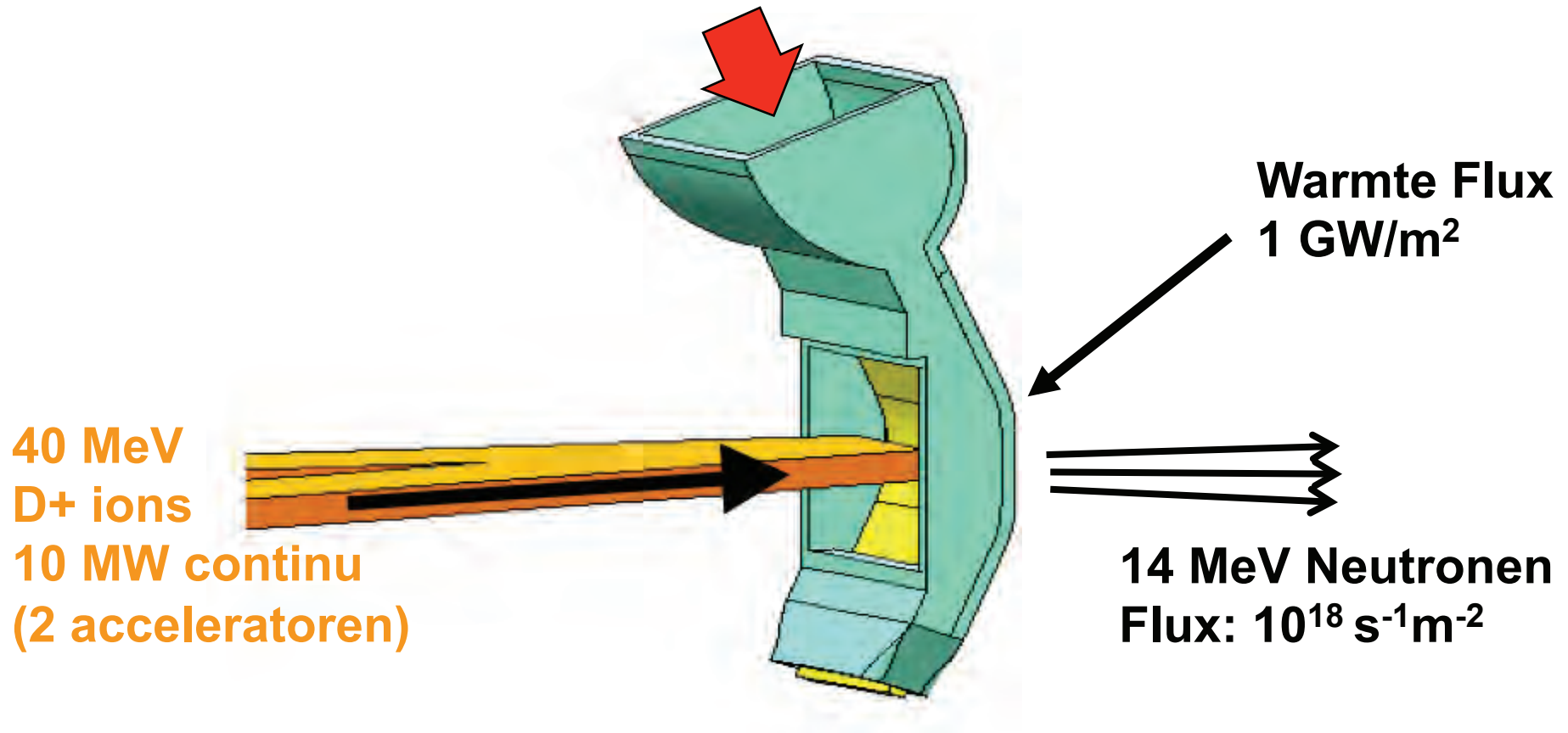


MISSIE VAN IFMIF

- Kwalificatie van kandidaat materialen
- Data voor het ontwerp, licentie en veilige operatie van DEMO
- Fundamentele studie van de interactie van materialen met hoog energetische neutronen

IFMIF: Principe van neutronengeneratie

Vloeibaar Lithium
(15m/s, 25mm dikke laag, 250 °C)



Alle details over IFMIF

IOP PUBLISHING and INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Nucl. Fusion 53 (2013) 116001 (18pp) doi:10.1088/0029-5515/53/11/116001

NUCLEAR FUSION

SPECIAL TOPIC

IFMIF: overview of the validation activities

J. Knaster¹, F. Arbeiter², P. Cara³, P. Favuzza⁴, T. Furukawa⁵,
F. Groeschel¹, R. Heidinger³, A. Ibarra⁶, H. Matsumoto¹,
A. Mosnier³, H. Serizawa⁷, M. Sugimoto⁸, H. Suzuki⁸
and E. Wakai⁵

¹ IFMIF/EVEDA Project Team, Rokkasho, Japan
² KIT, Karlsruhe, Germany
³ F4E, Garching, Germany
⁴ ENEA, Brasimone, Italy
⁵ JAEA, Oarai, Japan
⁶ CIEMAT, Madrid, Spain
⁷ Osaka University, Japan
⁸ JAEA, Rokkasho, Japan
E-mail: juan.knaster@ifmif.org

Received 16 January 2013, accepted for publication 7 June 2013
Published 11 September 2013
Online at stacks.iop.org/NF/53/116001

Abstract
The Engineering Validation and Engineering Design Activities (EVEDA) for the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF), an international collaboration under the Broader Approach Agreement between Japan Government and EURATOM, aims at allowing a rapid construction phase of IFMIF in due time with an understanding of the cost involved. The three main facilities of IFMIF (1) the Accelerator Facility, (2) the Target Facility and (3) the Test Facility are the subject of validation activities that include the construction of either full scale prototypes or smartly devised scaled down facilities that will allow a straightforward extrapolation to IFMIF needs. By July 2013, the engineering design activities of IFMIF matured with the delivery of an Intermediate IFMIF Engineering Design Report (IEDR) supported by experimental results. The installation of a Linac of 1.125 MW (125 mA and 9 MeV) of deuterons started in March 2013 in Rokkasho (Japan). The world's largest liquid Li test loop is running in Oarai (Japan) with an ambitious experimental programme for the years ahead. A full scale high flux test module that will house ~1000 small specimens developed jointly in Europe and Japan for the Fusion programme has been constructed by KIT (Karlsruhe) together with its He gas cooling loop. A full scale medium flux test module to carry out on-line creep measurement has been validated by CRPP (Villigen).
(Some figures may appear in colour only in the online journal)

1. Introduction
In DEMO like in future fusion power plants, the deuterium-tritium nuclear fusion reactions will generate a large quantity of 14.1 MeV neutrons that will collide with the materials of the reactor vessel. The first wall, a combination of layers of different materials that aims to maximize the conversion of neutrons into thermal energy and breed tritium will be critically exposed. Understanding the degradation of the mechanical properties throughout the reactor's operational life is a key parameter to allow the design and eventual facility licensing by the corresponding nuclear authorities.
Inelastic collisions of neutrons with the nuclei in the structural materials over the threshold incident energy of around 3 MeV will transmute heavy nuclei, which can decay releasing p⁺- and α-particles. In turn, the elastic collisions are measured by NRT displacements per atom (NRT dpa) [1] with a cross section inversely proportional to the average displacement energy threshold for production of a Frenkel vacancy-interstitial atom defect pair in the material. Not all of the materials will present the same NRT dpa under the same neutron bombardment, neither will all areas inside the reactor vessel undergo the same flux and spectrum of neutrons. In addition, NRT dpa do not take into account the time-evolution

0029-5515/13/116001+18\$33.00 1 © 2013 IAEA, Vienna Printed in the UK & the USA

“IFMIF: Overview of the validation Activities”

Juan Knaster et al.,
Nuclear Fusion 53 (2013) 116001

DEMO R&D - 3

In Situ Tritium Bereiding

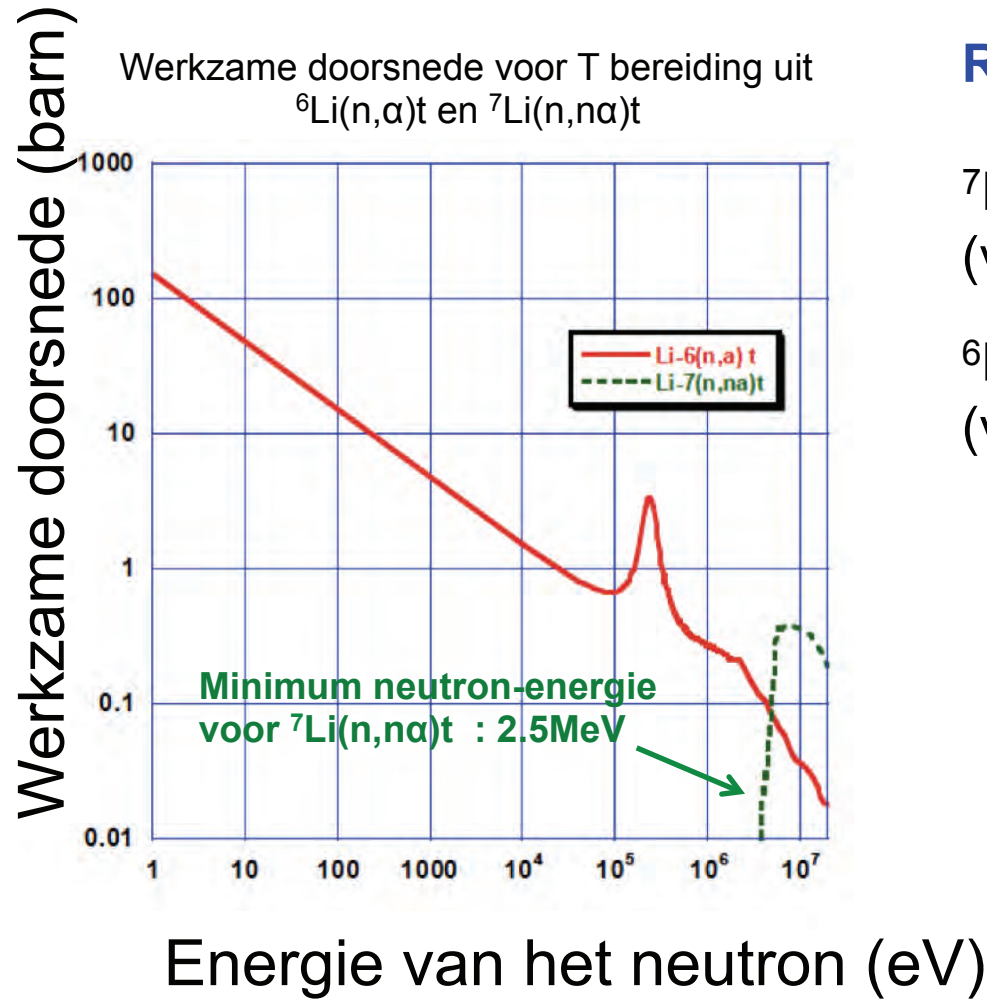
Brandstofverbruik in een toekomstige fusiereactor

Jaarlijks verbruik aan D en T Voor 1000MW, thermisch in een toekomstige fusiecentrale

- D : ~ 100g / dag of ~ 36kg / jaar (15% more if losses are included)
- T : ~ 151g / dag of ~ 55 kg / jaar (15% more if losses are included)
- Jaarproductie van T: ~ 1kg
- Dit komt neer op ongeveer 100kg ${}^6\text{Li}$ per jaar (+ ~15%)

Technieken voor in-situ T bereiding absoluut noodzakelijk

Details over T bereiding uit Li



Reacties

${}^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + n - 2.8 \text{ MeV}$
(voor hoog energetische neutronen)

${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + 4.8 \text{ MeV}$
(voor laag energetische neutronen)

Natuurlijk Lithium:

92.5% ${}^7\text{Li}$ en 7.5% ${}^6\text{Li}$

In welke vorm Lithium te gebruiken ?

Keramische materialen (oxides in vaste vorm)

LiO_2 , LiAlO_2 , Li_2SiO_3 , **LiSiO_4** , Li_8ZrO_6 , Li_2TiO_3

Eutectisch mengsel (vloeibare vorm)

$\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ (17 atoom% Li)

Optimalisatie van de 'broed'panelen nodig:

Absorptie van neutronen in metaalstructuren minimaliseren : zo weinig mogelijk metaal...

Maar : veiligheid en levensduur ?

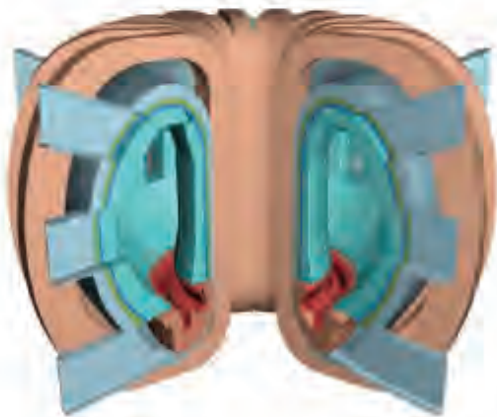
Aanrijking met ^6Li , om zoveel mogelijk de reeds afgeremde neutronen te benutten.

Hoe groot moet de aanrijking zijn ? 30% ?

Test modules voor T productie in ITER

- ▶ **Helium-Cooled Ceramic Breeder (HCCB)** concepts using Ferritic/Martensitic Steel (FMS) structures, Be-multiplier, and Li_2TiO_3 or Li_4SiO_4 or Li_2O ceramic breeder: *China, EU, Japan, RF, Korea, USA*
- ▶ **Water-Cooled Ceramic Breeder (WCCB)** concept using FMS structures, Be-multiplier, and Li_2TiO_3 or other ceramic breeder: *Japan*

**SOLID
Breeder**



**LIQUID
Breeder**

- ▶ **Helium-Cooled Lithium-Lead (HCLL)** concepts using liquid eutectic Pb-17Li, FMS structures: *EU, China*
- ▶ **Dual Coolant "He/Pb17Li" (DCLL)** concepts using liquid eutectic Pb-17Li, FMS structures: *US, China*
- ▶ **Dual Coolant "He/Molten Salt" (DCMS)** concepts using liquid FLiBe or FLiNaBe, FMS structures: *USA, Japan*
- ▶ **Self-Cooled liquid Lithium (SCL)** concept using Be-multiplier & Vanadium Alloy structures: *RF, Japan*
- ▶ **Helium-Cooled liquid Lithium (HCLi)** concept using FMS structures: *Korea*

Besluit

- ***Fusie is een van de weinige opties voor onze toekomstige energievoorziening***
 - *een moeilijk maar veelbelovend proces*
 - *nog vele jaren ontwikkeling nodig*
- ***JET, de grootste tokamak ter wereld, heeft het 'pad geëffend' voor ITER***
- ***ITER, de volgende grote stap in het fusieonderzoek***
 - ***Bouwplaats : Cadarache (Provence)***
 - ***Constructie volop aan de gang***
- ***Voor het eerst in de geschiedenis heeft de mens de kennis om materie op te warmen tot 200 miljoen graden en veilig op te sluiten...***

EEN GROTE UITDAGING MET EEN GROTE BELOFTE

