Matematikens betydelse för att lösa världens energiproblem

Tünde Fülöp

Chalmers tekniska högskola

2013-11-09

Enerbibehovet är enormt!

	2008		2050
Befolkning	6.7 miljarder	$\Rightarrow$	10 miljarder
Världsgenomsnitt	2.4 kW		3.0 kW

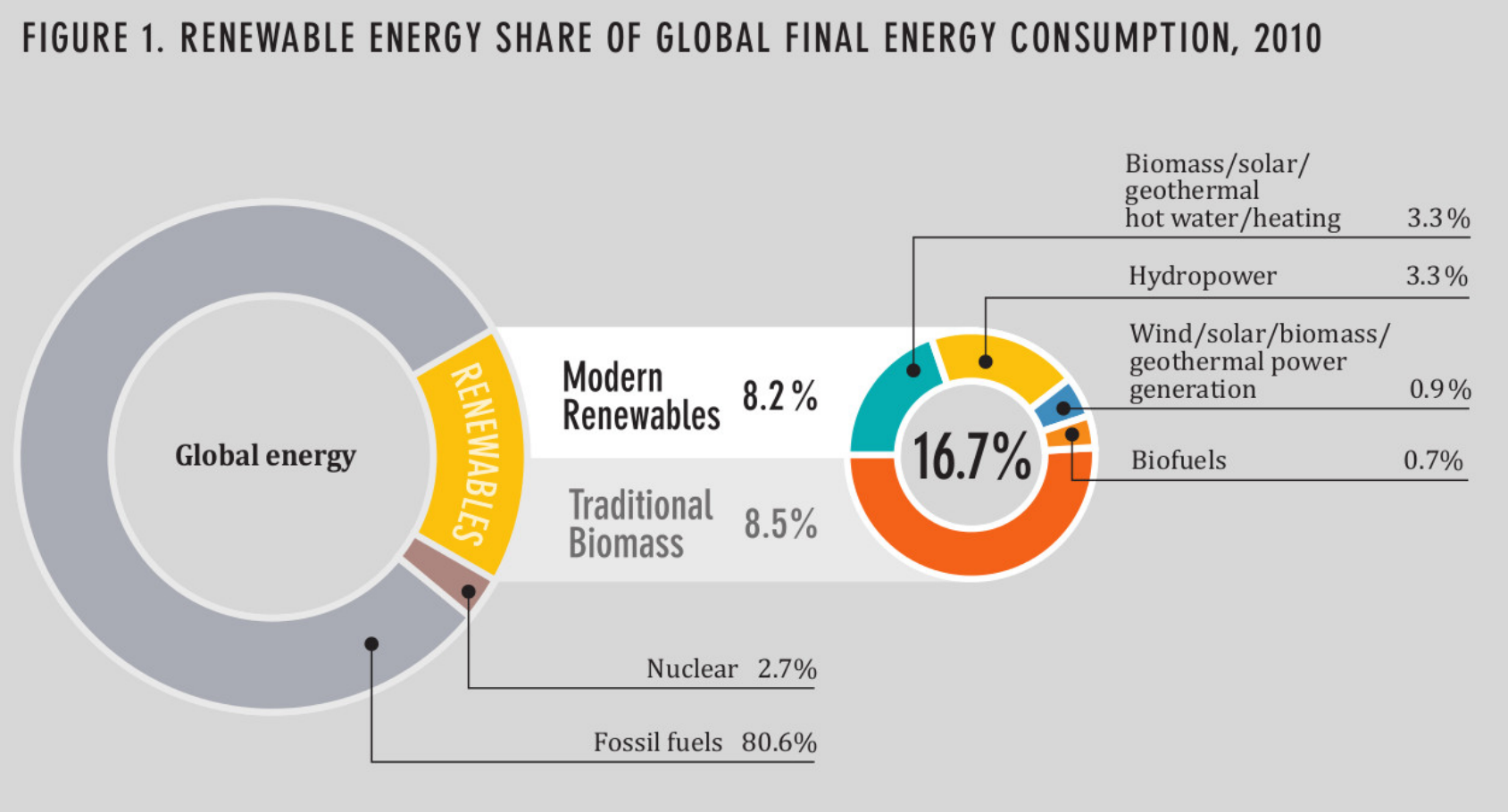
Effektförbrukning:

1990	2008	2050
11.7 TW	16.1 TW	30.0 TW

$\simeq$ 14 TW behövs inom 40 år
14000 GW/40 år = 350 GW/år = **1 GW/dag**

Goda nyheter: De stora investeringarna kan sätta fart på ekonomin.

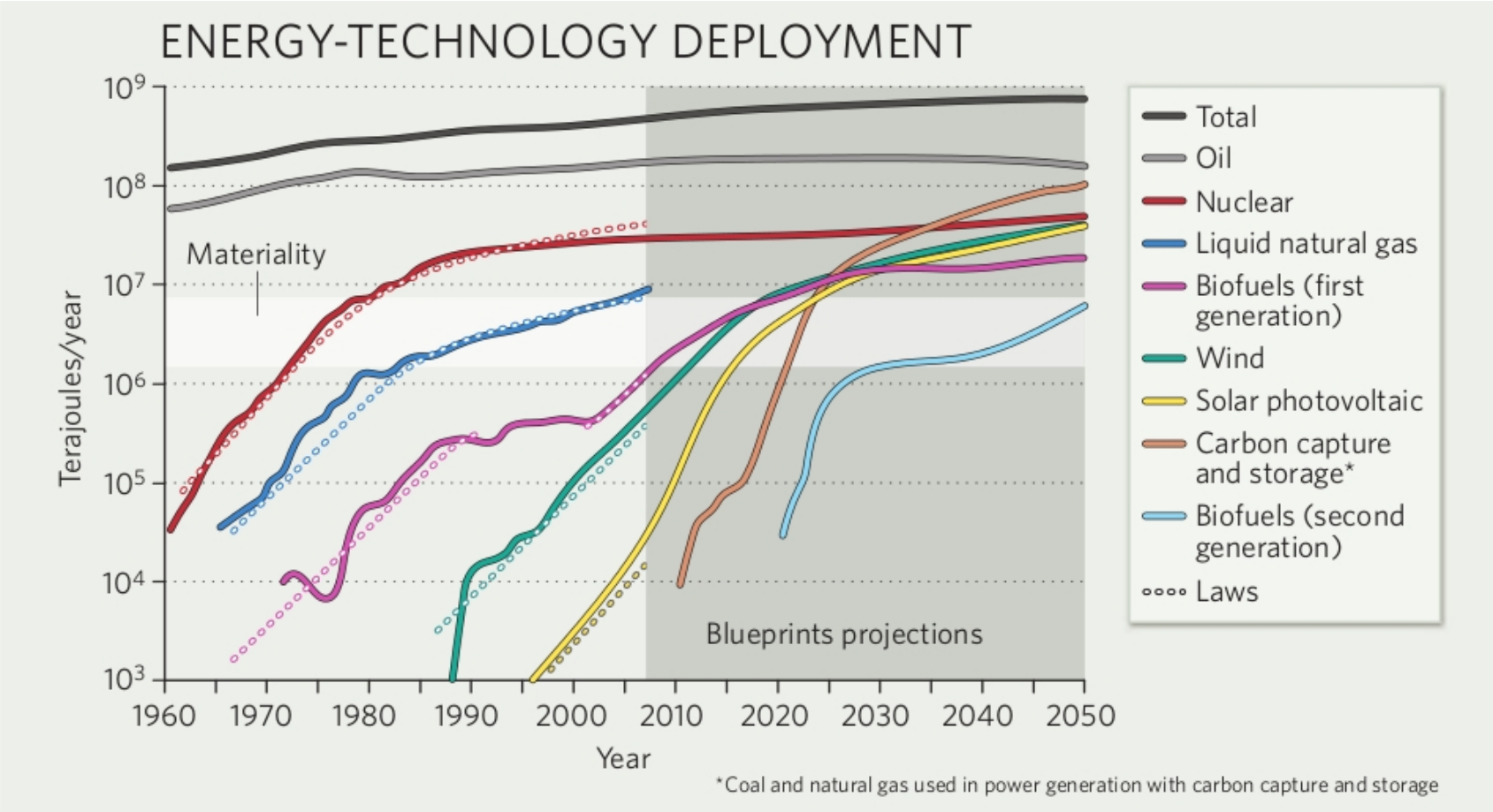
Fossila bränslen dominerar idag



Världens energiförsörjning&förbrukning domineras av fossila bränslen.

Källas: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century www.ren21.net

Förändring tar tid



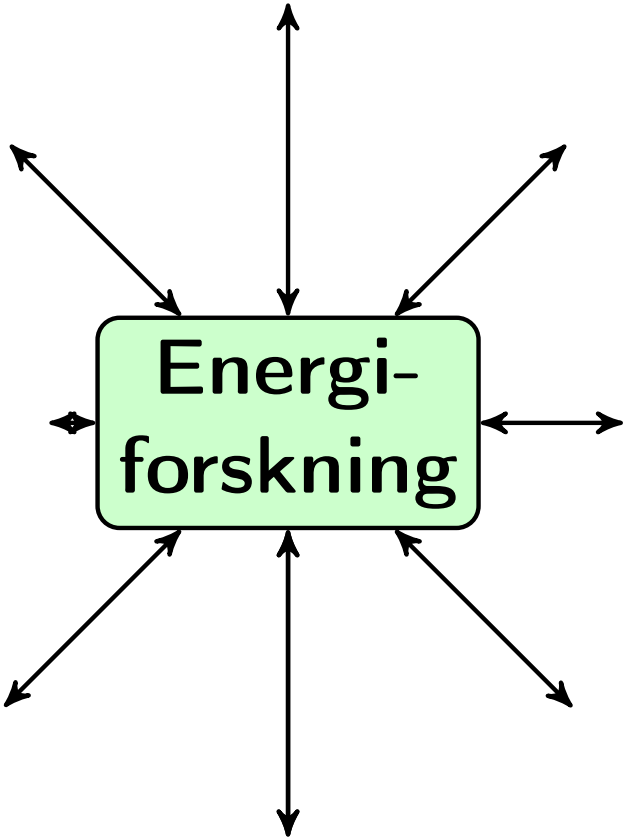
Det tar cirka 30 år för en ny teknik att bidra med 1% av energiförsörjningen!

Vad kan vi göra?

- Det är viktigt att
  - följa flera parallella vägar;
  - kontinuerligt bygga upp kompetens via forskning och utbildning.
- Vi måste utveckla ett brett spektrum av olika energilösningar
  - olika lösningar lämpar sig för olika situationer och på olika platser
  - vi kan inte snabba upp energiomställningen om vi satsar på ett fåtal tekniker
  - en smart balans mellan olika källor kan lösa de snabba fluktuationerna som förnybara källor lider av
- Vi behöver också grundforskning!

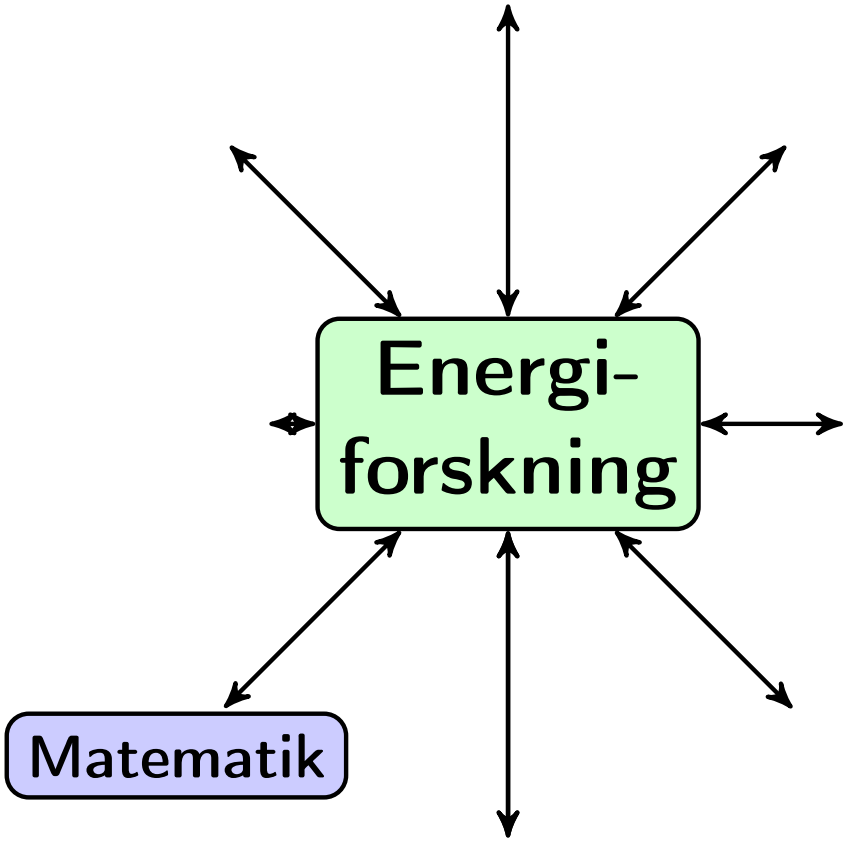
Energiforskning: alla kan bidra!

Energiforskning är interdisciplinärt!



Energiforskning: alla kan bidra!

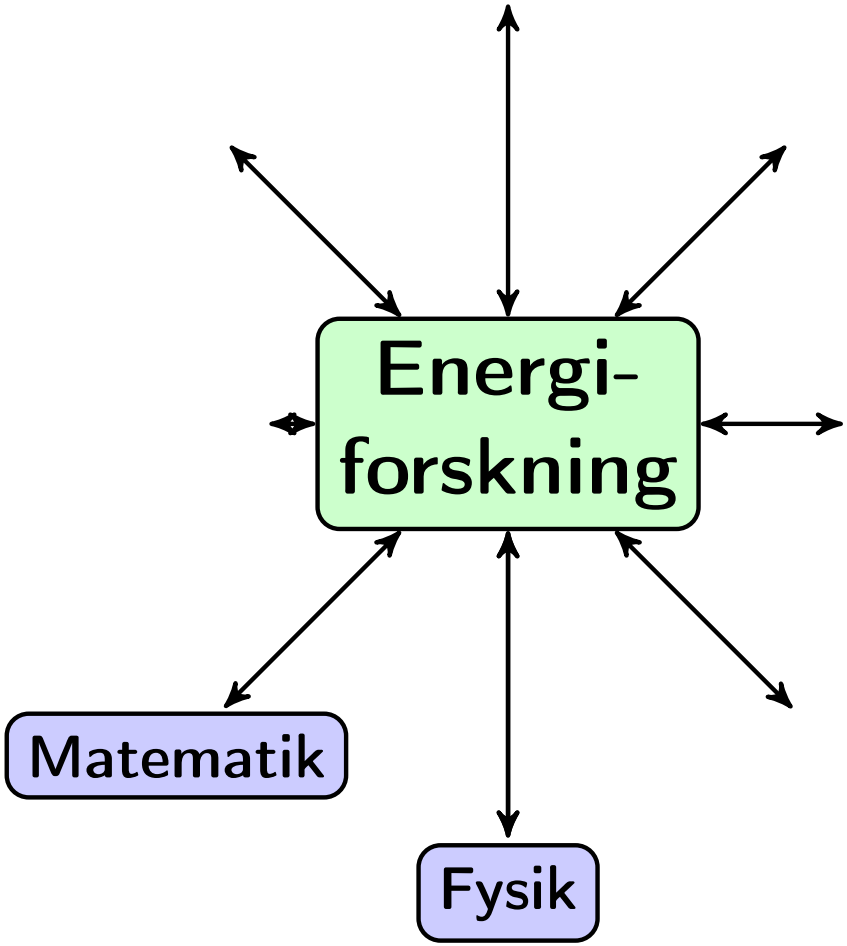
Energiforskning är interdisciplinärt!



Den är naturligt kopplad till fysik och matematik genom det fundamentala energibegreppet och de matematiska metoder som behövs för teoretisk modellering.

Energiforskning: alla kan bidra!

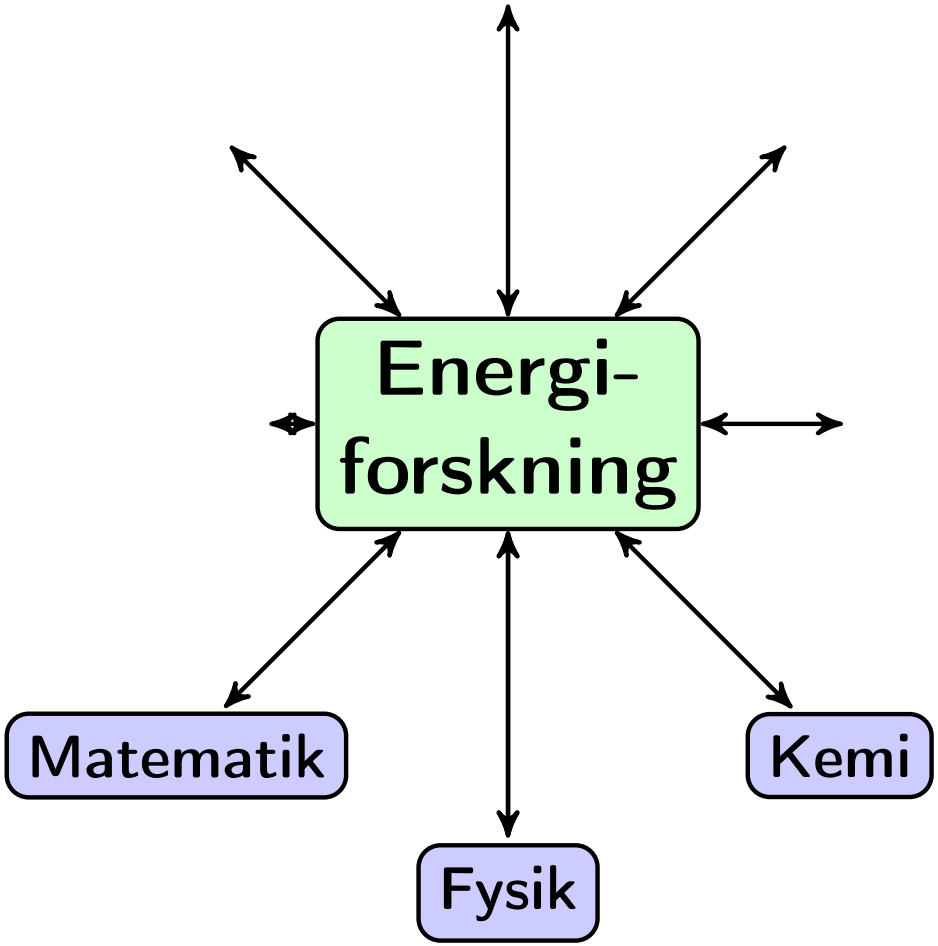
Energiforskning är interdisciplinärt!



Den är naturligt kopplad till fysik och matematik genom det fundamentala energibegreppet och de matematiska metoder som behövs för teoretisk modellering.

Energiforskning: alla kan bidra!

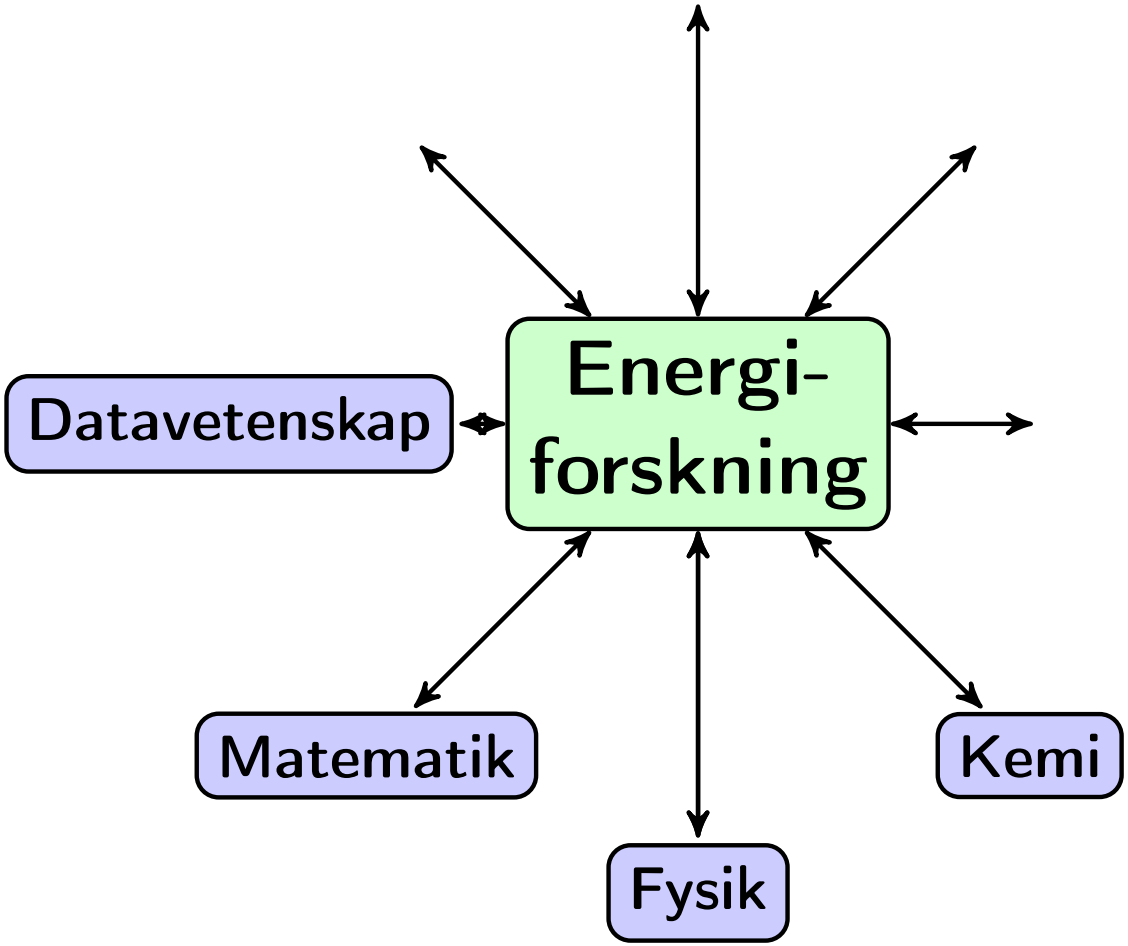
Energiforskning är interdisciplinärt!



Till kemi genom förståelse av isotoper, fission, fusion, förbränning av fossila bränslen och produktion av förnyelsebar energi

Energiforskning: alla kan bidra!

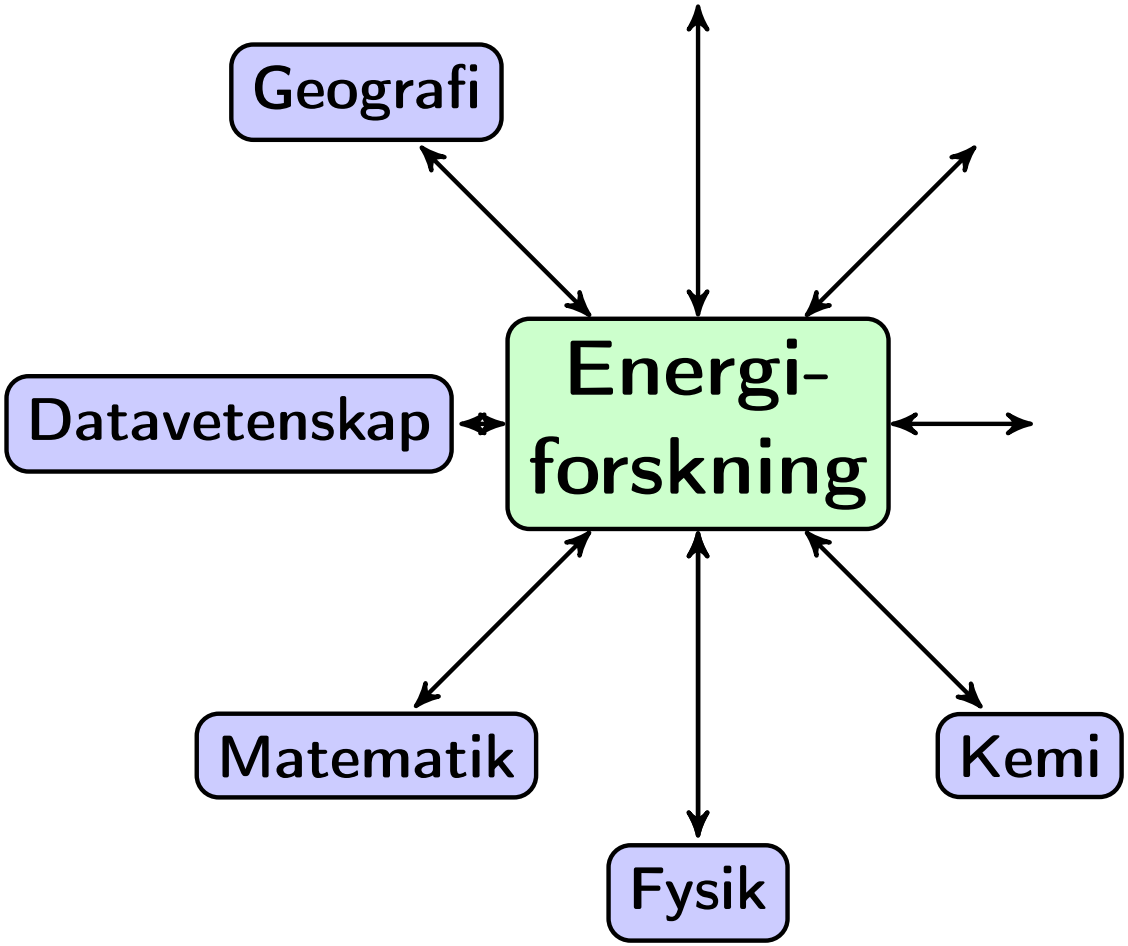
Energiforskning är interdisciplinärt!



Den relateras till datavetenskap via behovet av simulering, dataanalys, visualisering, kontrollsystem, etc.

Energiforskning: alla kan bidra!

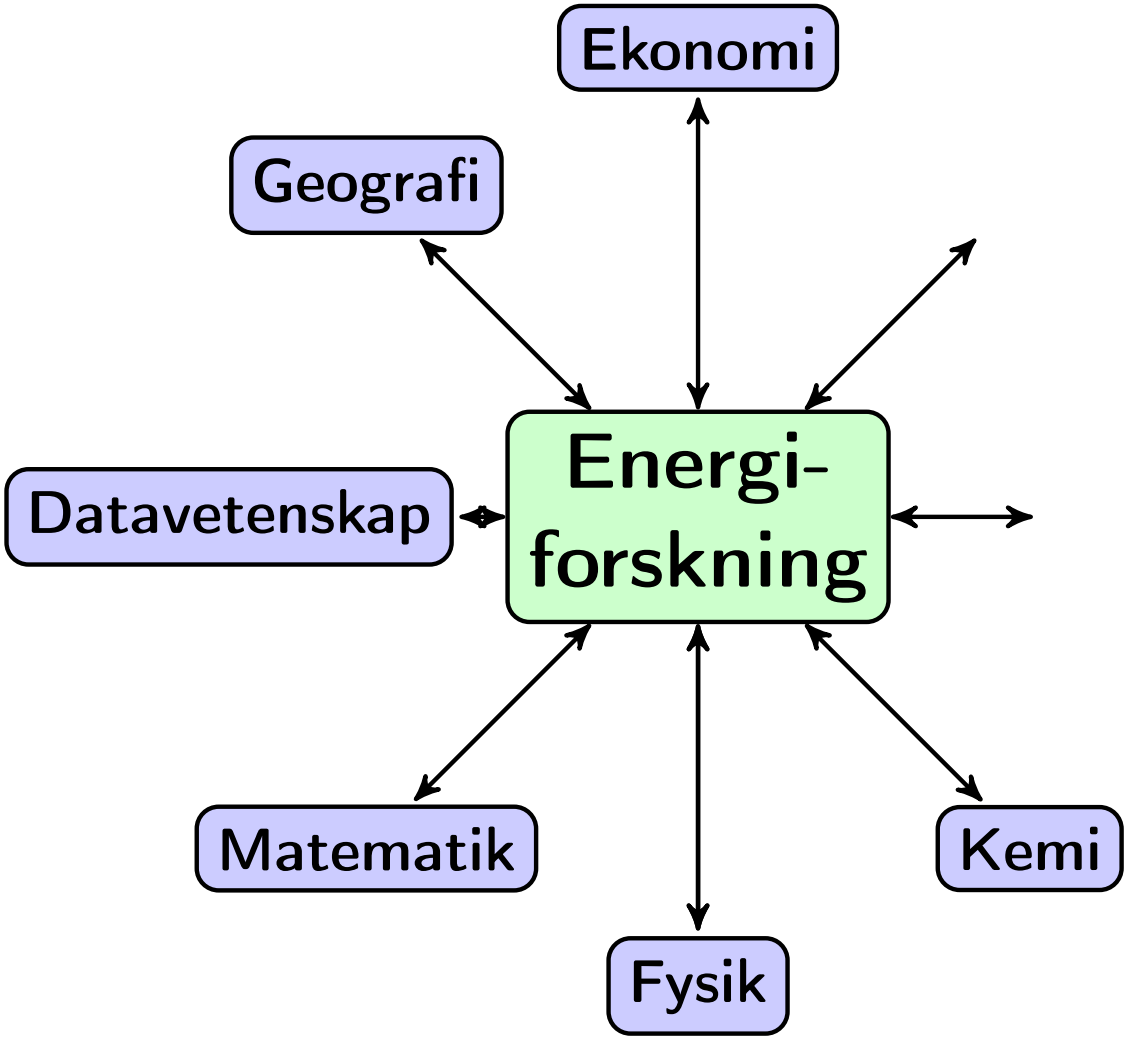
Energiforskning är interdisciplinärt!



Den kopplas också till geografi genom placeringen av energikällorna

Energiforskning: alla kan bidra!

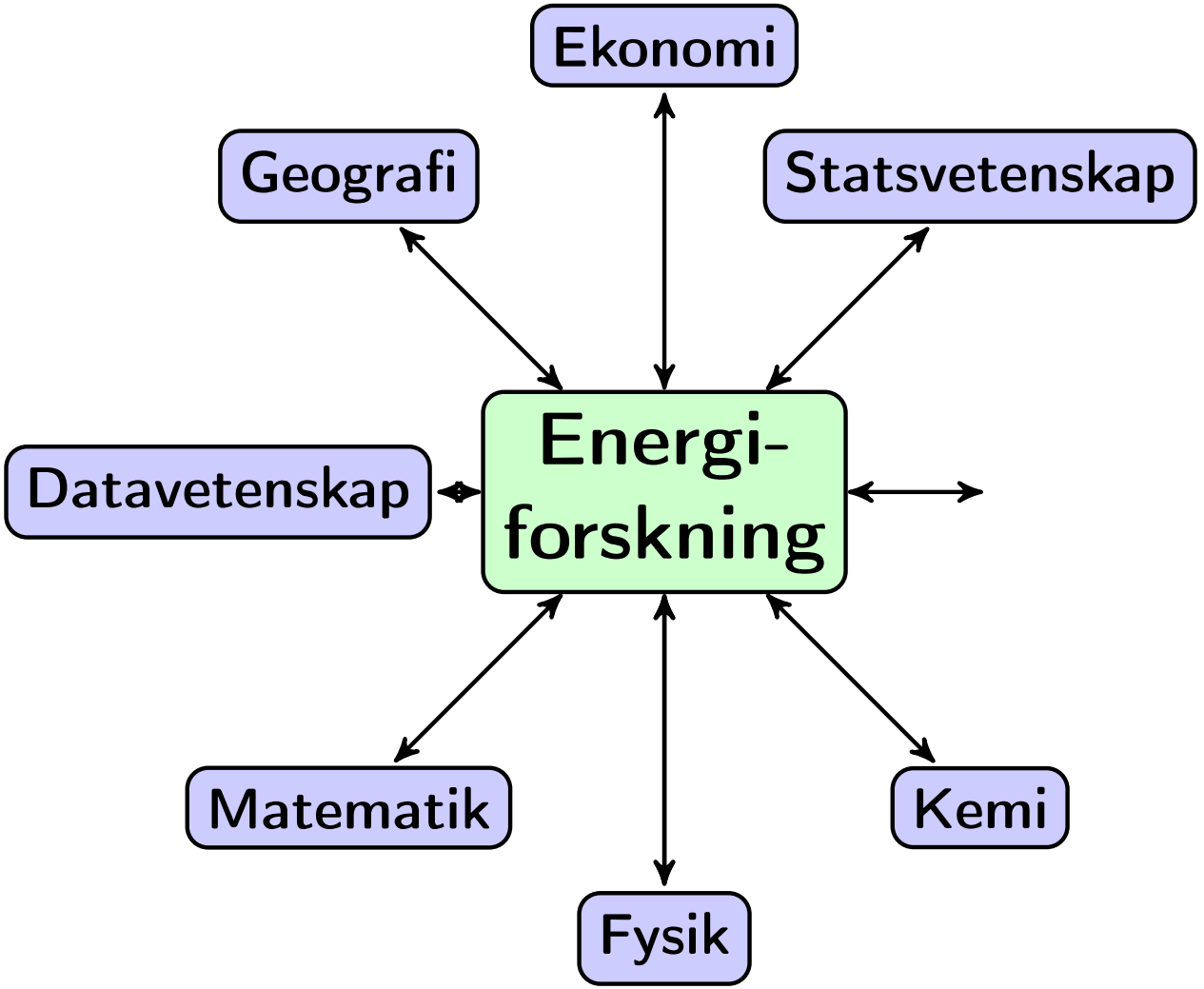
Energiforskning är interdisciplinärt!



till ekonomi
genom
energiprissättning
och
utsläppsavgifter

Energiforskning: alla kan bidra!

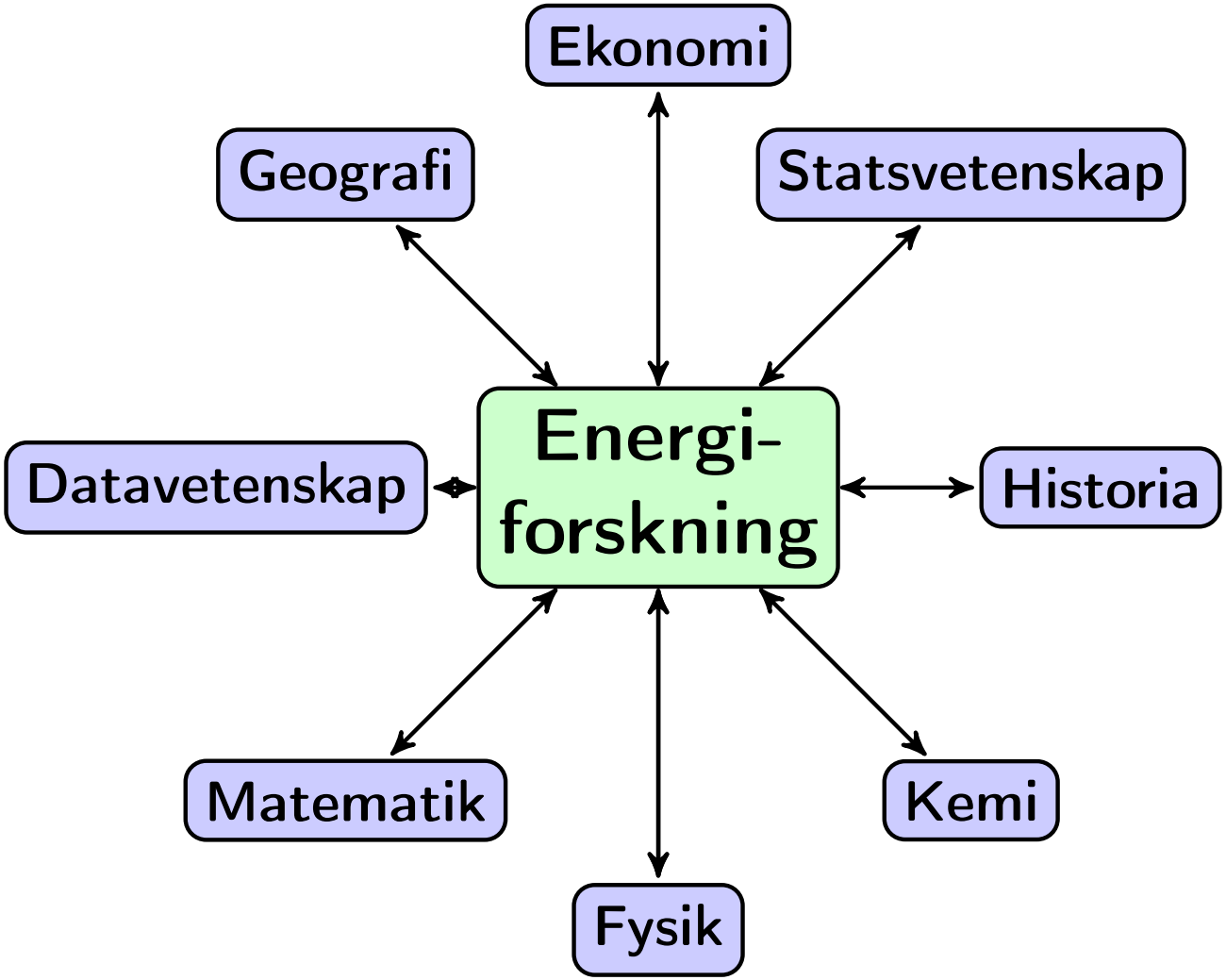
Energiforskning är interdisciplinärt!



till statsvetenskap på grund av behovet av internationella överenskommelser och energilagstiftning

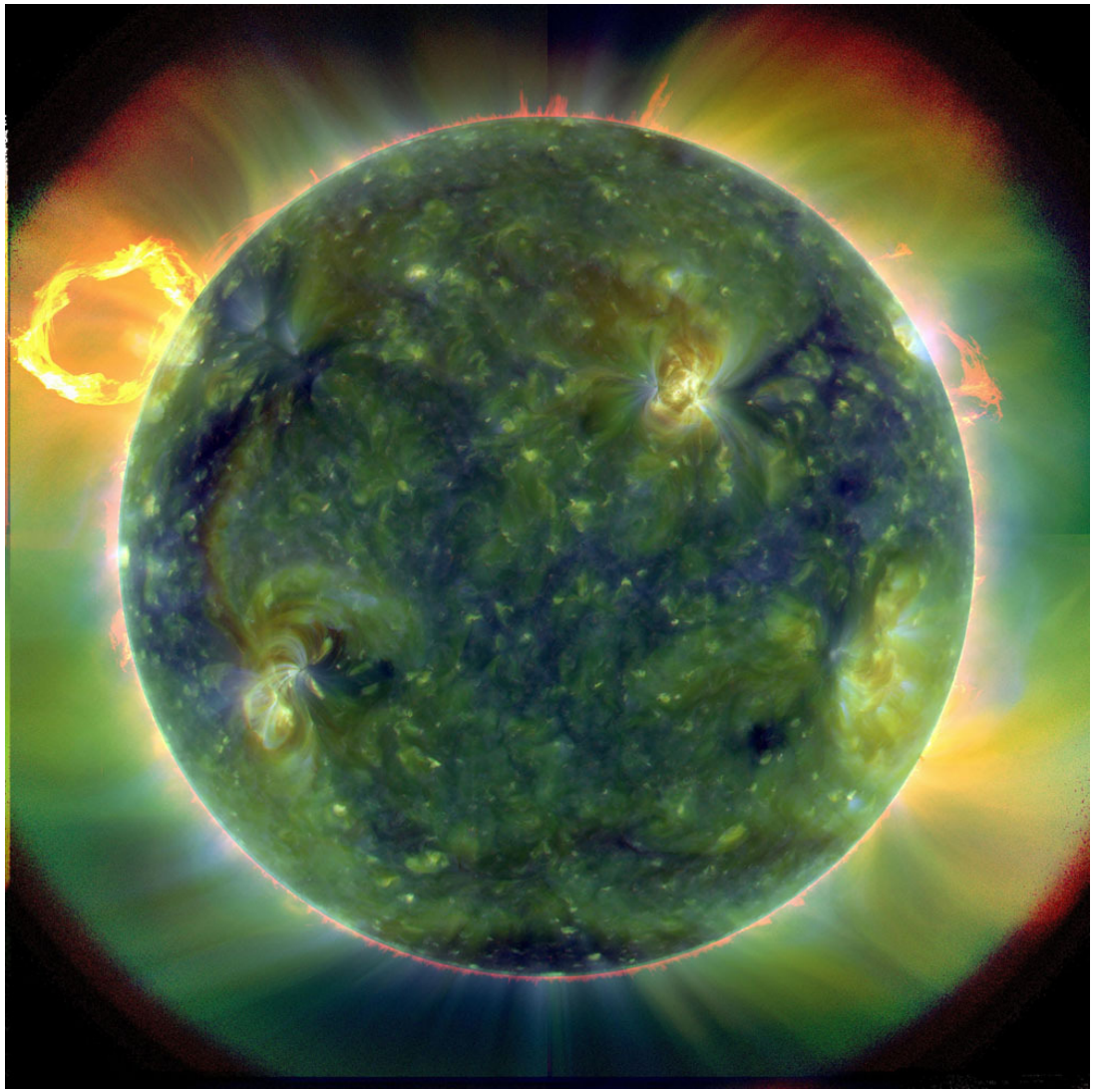
Energiforskning: alla kan bidra!

Energiforskning är interdisciplinärt!



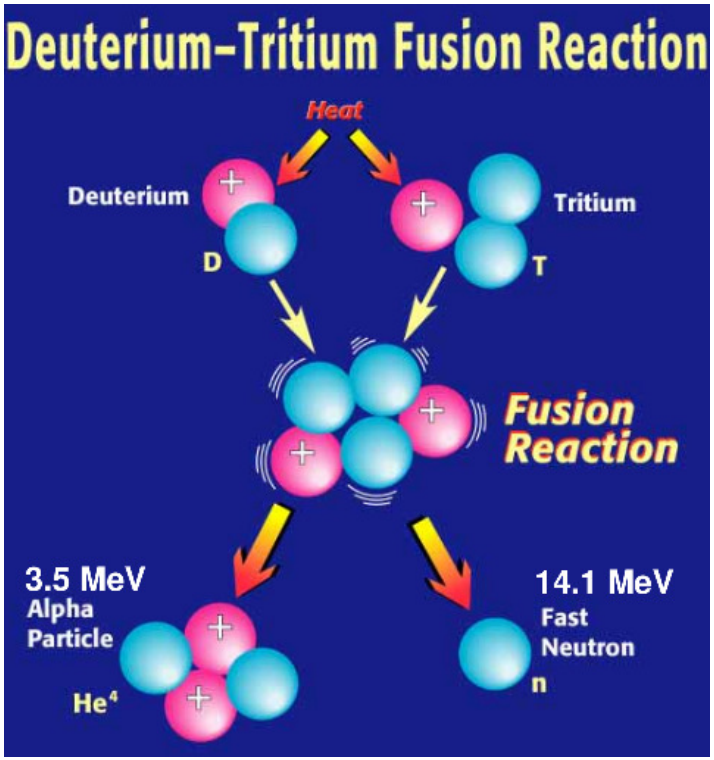
och till historia för förståelsen av kopplingen till civilisationers uppgång och fall

En dag utan fusion är en dag utan solsken!



Vad är fusion?

- Sammansmältning av lätta atomkärnor
- Deuterium+tritium är tyngre än helium+neutron
- Skillnaden i massa frigörs som energi $E = mc^2$
- Potential till att bli en storskalig, säker och miljövänlig energikälla



Bränsle

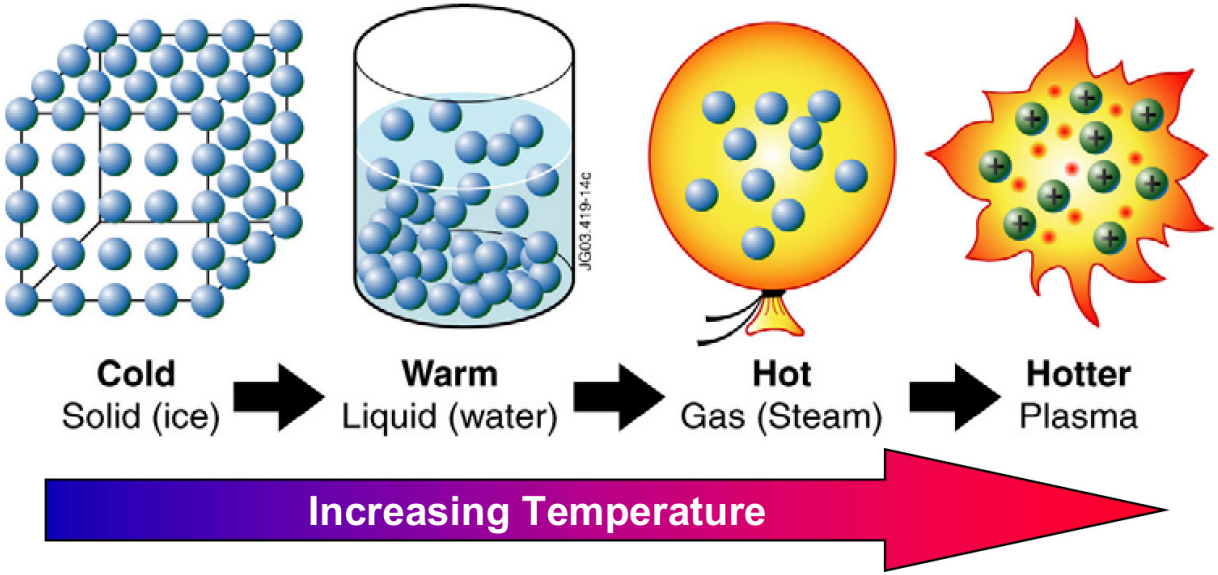
- **Deuterium** från vatten (30 g/ton) $\rightarrow$ i praktiken obegränsat
- **Tritium** måste tillverkas
  - n $+{}^{6}\mathrm{Li} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + \mathrm{T}$
  - fusionsreaktorns väggar ska täckas med litium
  - tritium produceras därmed på plats
- **Litium** finns i jordskorpan och havsvatten

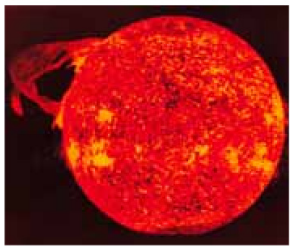
D från 3 flaskor vatten och Li från 3 stenar ger tillräckligt el för en familj för ett år

Fusion skulle vara "dematerialiserad" energiproduktion

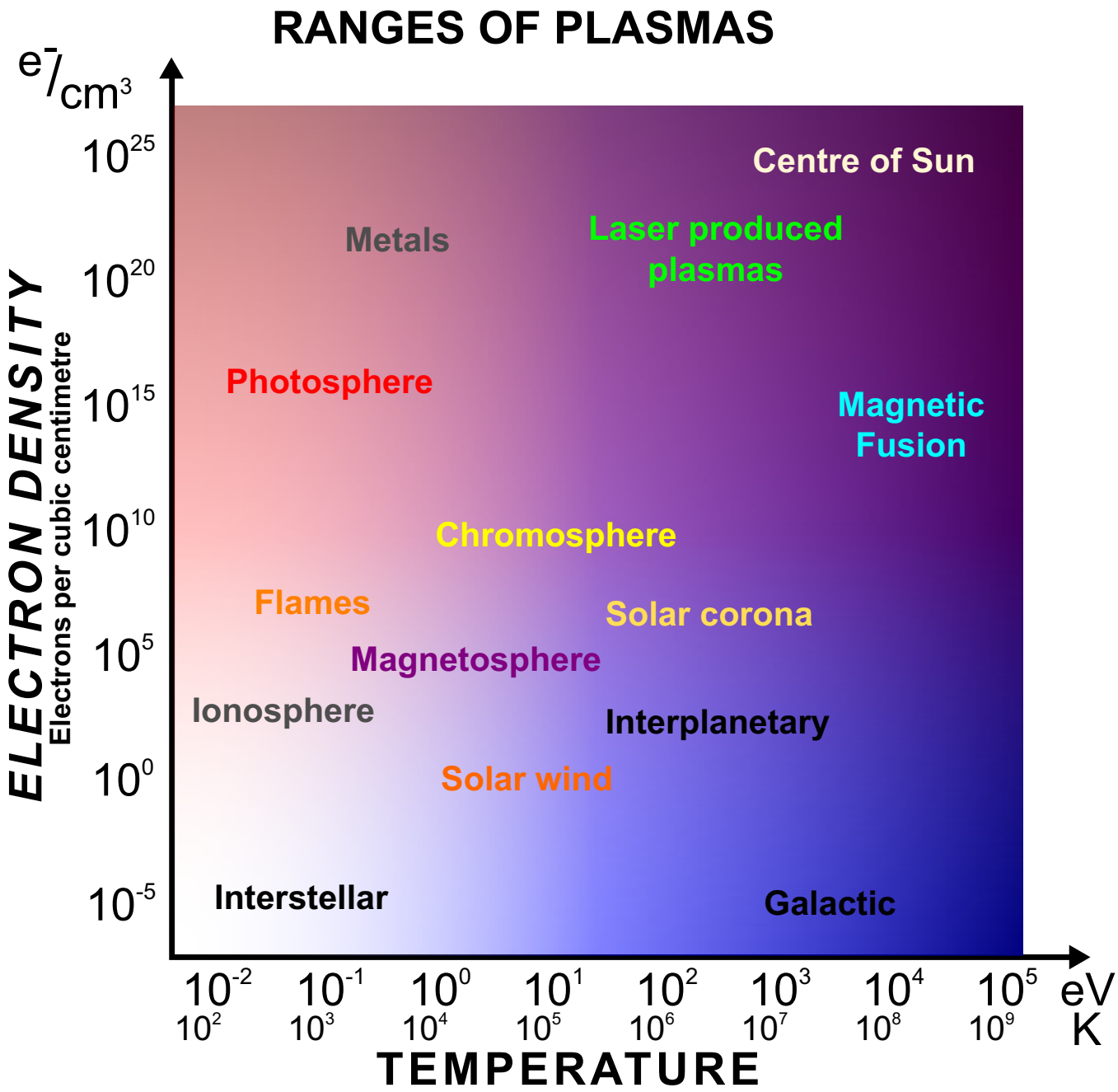
1.5 ton bränsle per år
Sveriges elektricitet

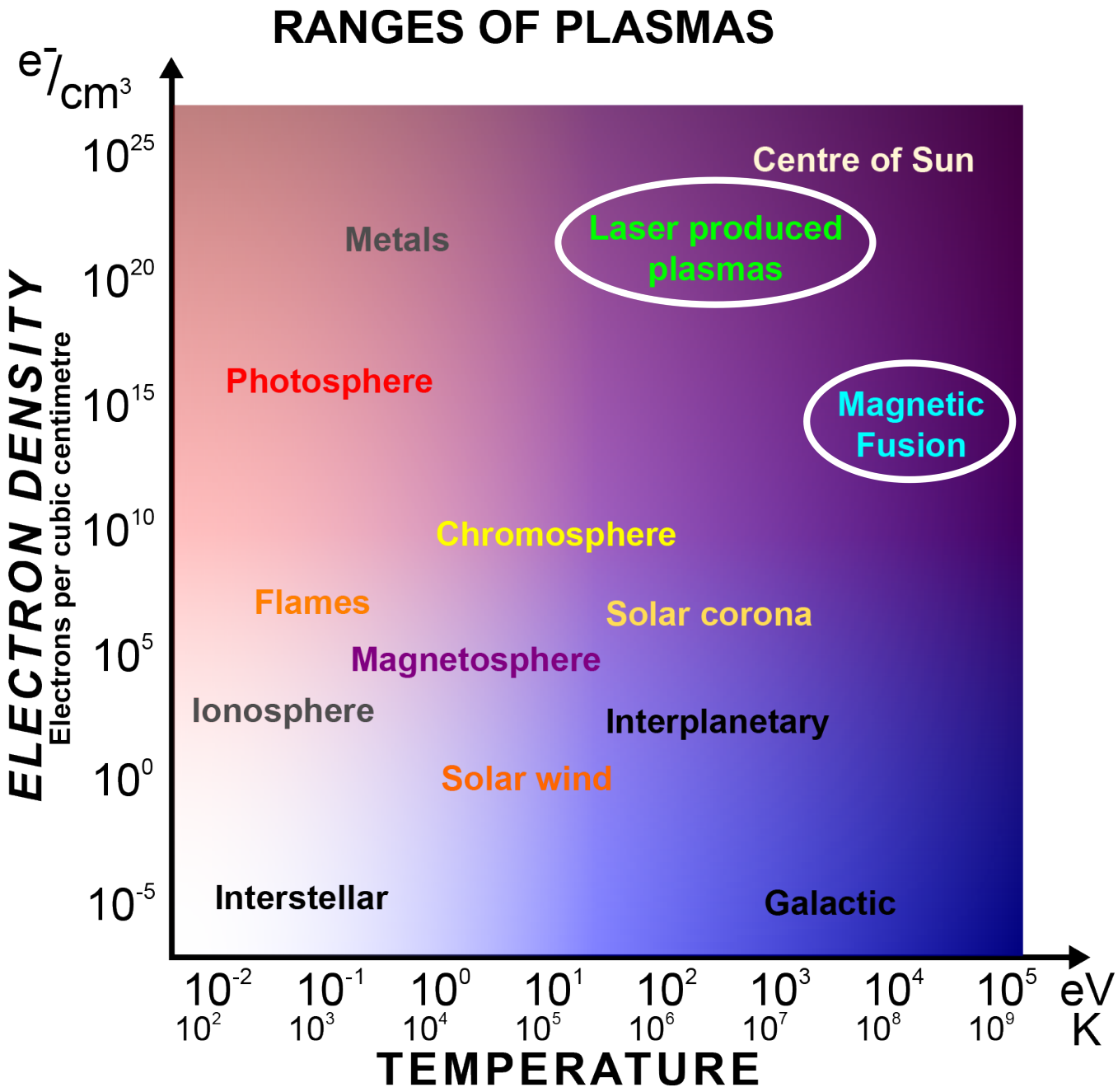
Plasma är hett!



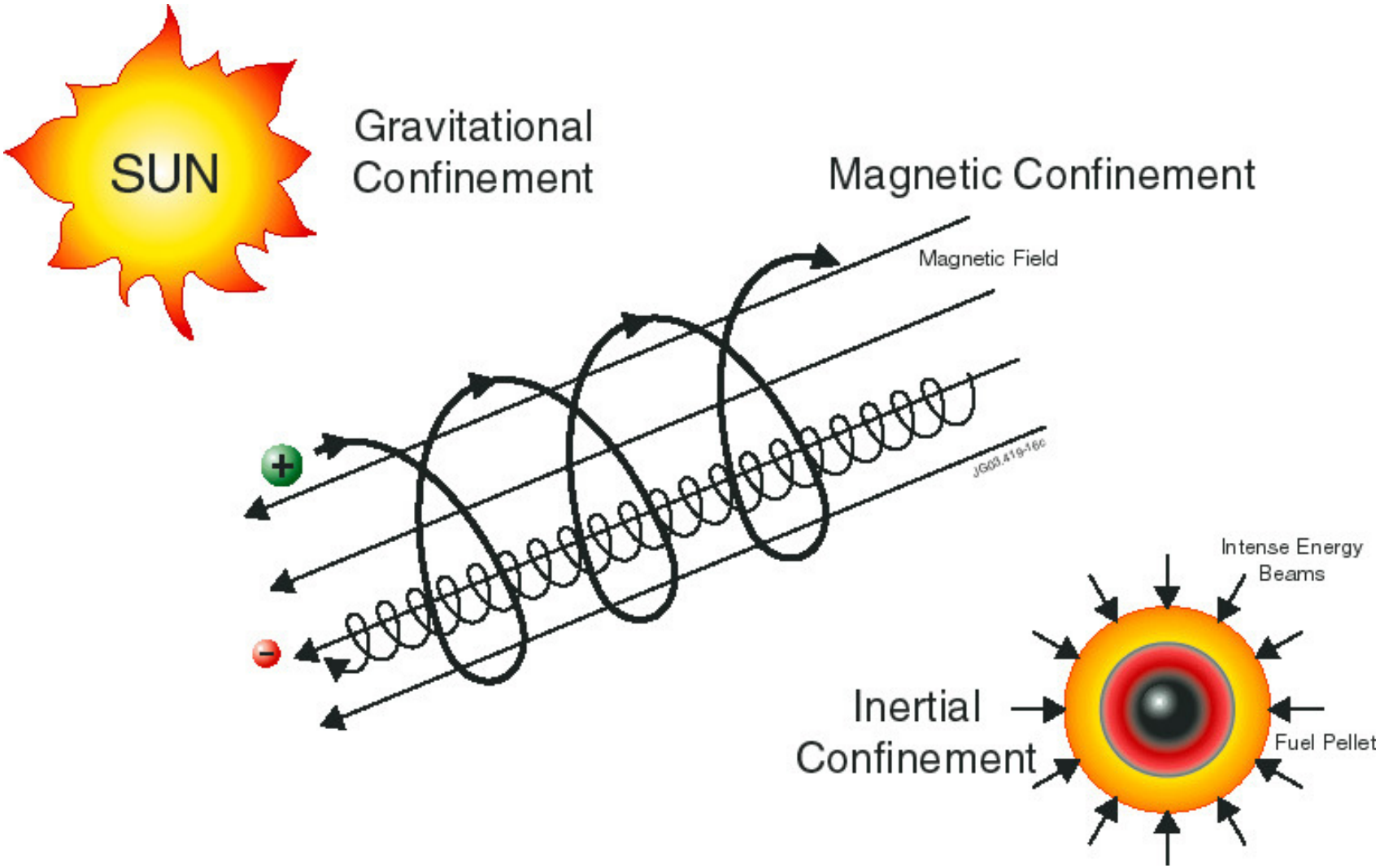


A plasma is electrically conducting and very reactive

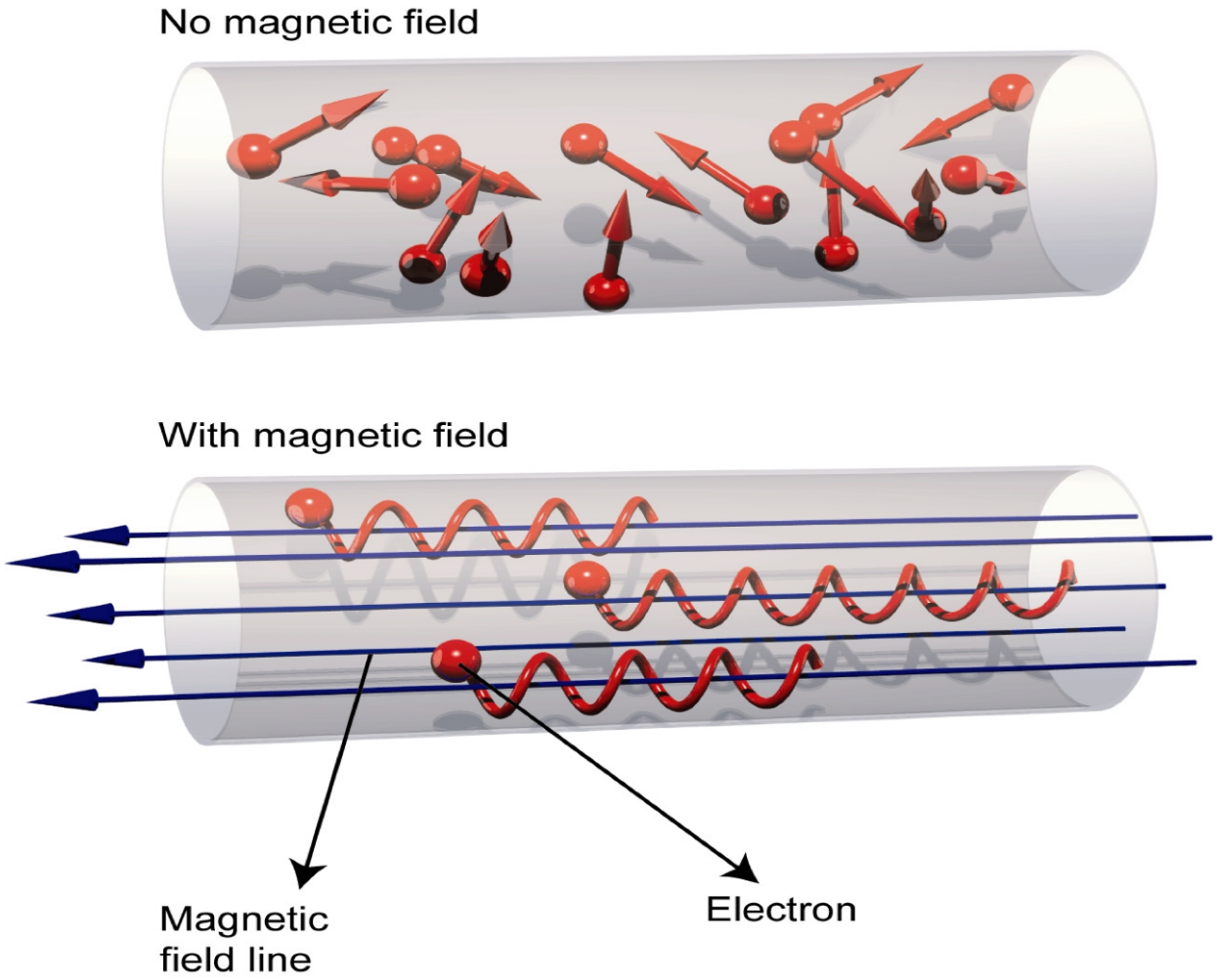

RANGES OF PLASMAS
e⁻/cm³
ELECTRON DENSITY
Electrons per cubic centimetre
10^25
10^20
10^15
10^10
10^5
10^0
10^-5
Centre of Sun
Metals
Laser produced plasmas
Photosphere
Magnetic Fusion
Chromosphere
Flames
Solar corona
Magnetosphere
Ionosphere
Interplanetary
Solar wind
Interstellar
Galactic
10^-2 10^-1 10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5 eV
10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8 10^9 K
TEMPERATURE


RANGES OF PLASMAS
e⁻/cm³
ELECTRON DENSITY
Electrons per cubic centimetre
10^25
10^20
10^15
10^10
10^5
10^0
10^-5
Centre of Sun
Metals
Laser produced plasmas
Photosphere
Magnetic Fusion
Chromosphere
Flames
Solar corona
Magnetosphere
Ionosphere
Interplanetary
Solar wind
Interstellar
Galactic
10^-2 10^-1 10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5 eV
10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8 10^9 K
TEMPERATURE

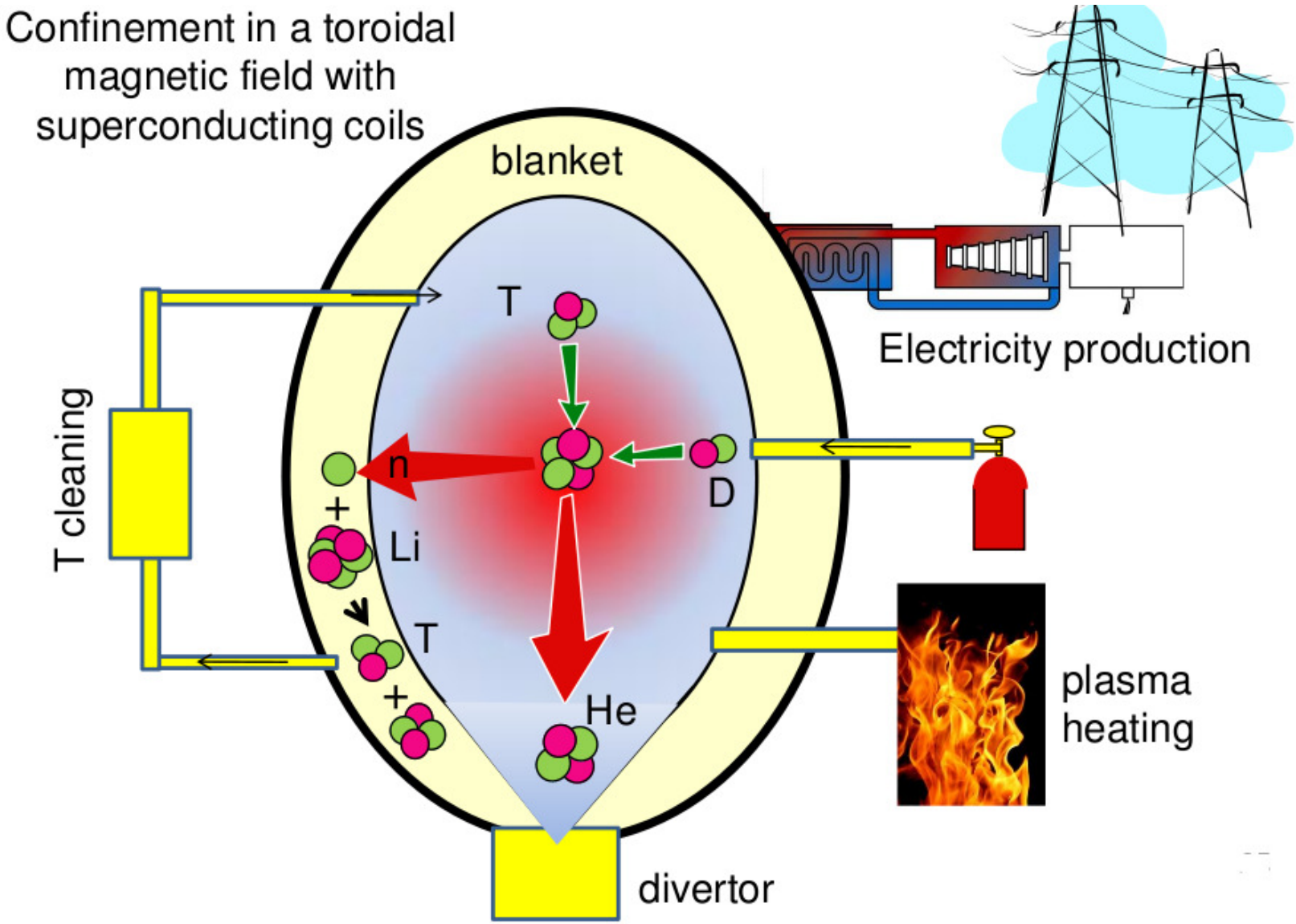
Plasmats inneslutning



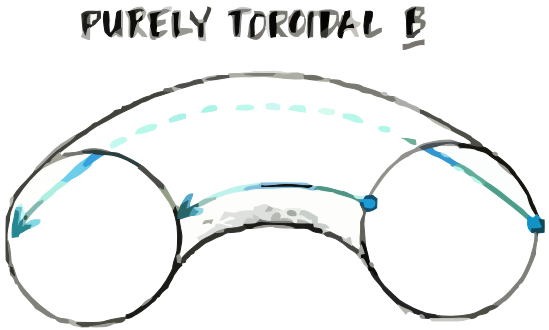
To **B** or not to be

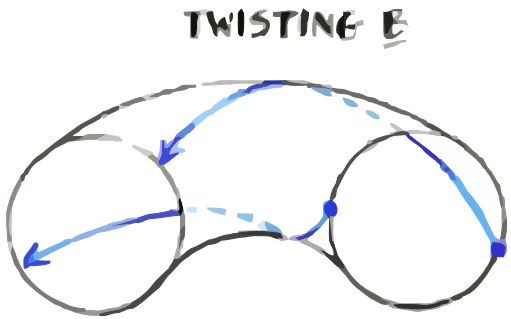


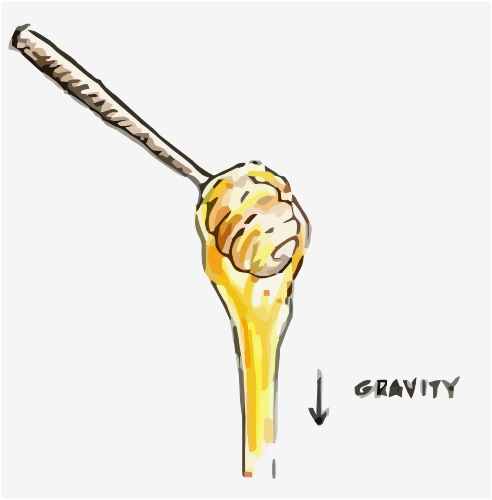
Fusionsreaktorns princip

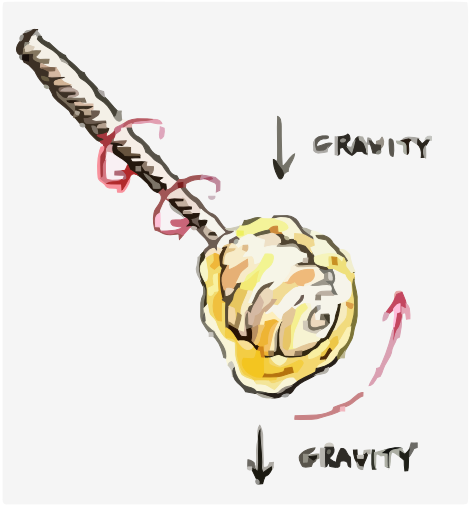


Magnetfältet behöver skruvas!



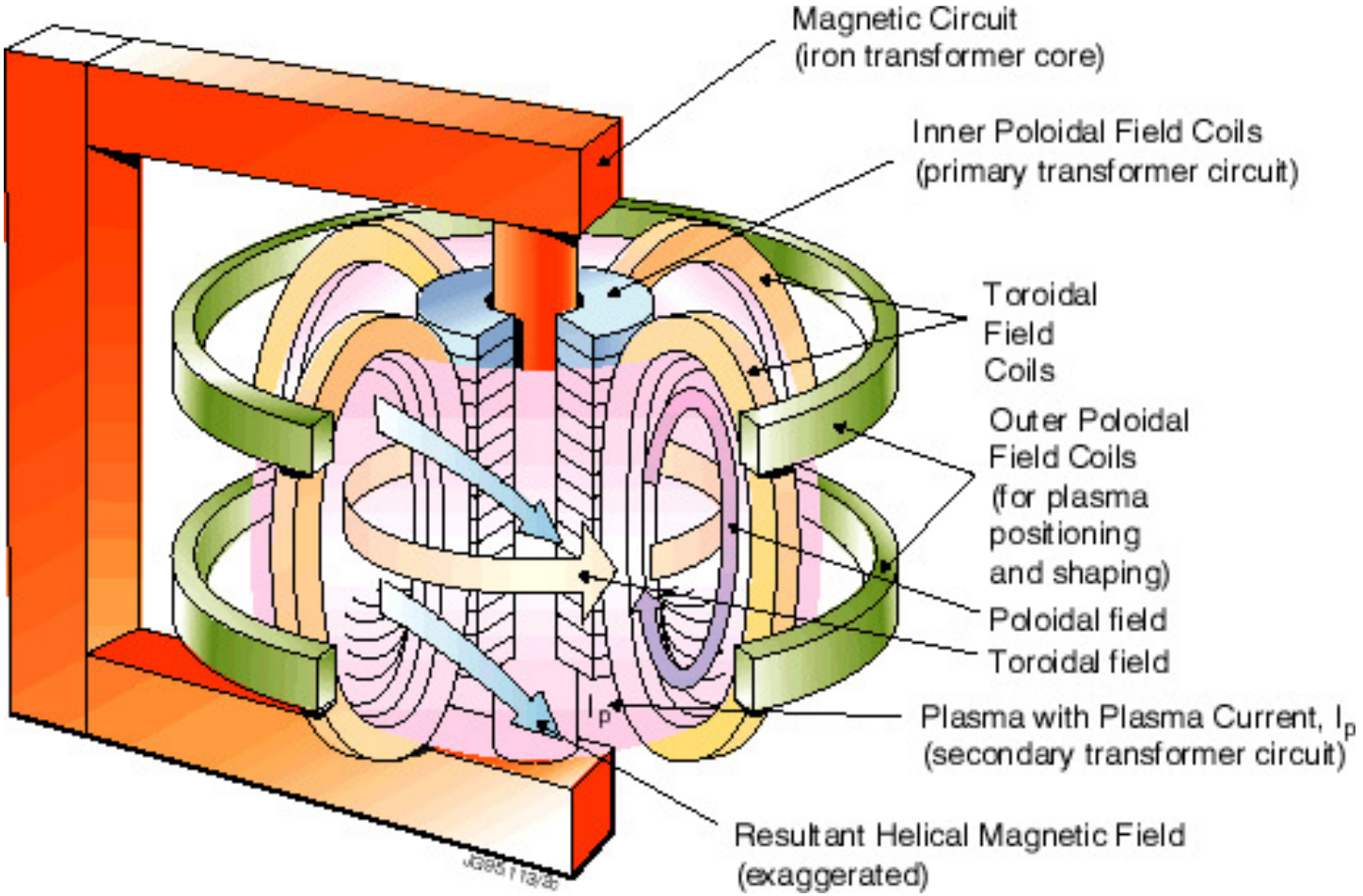






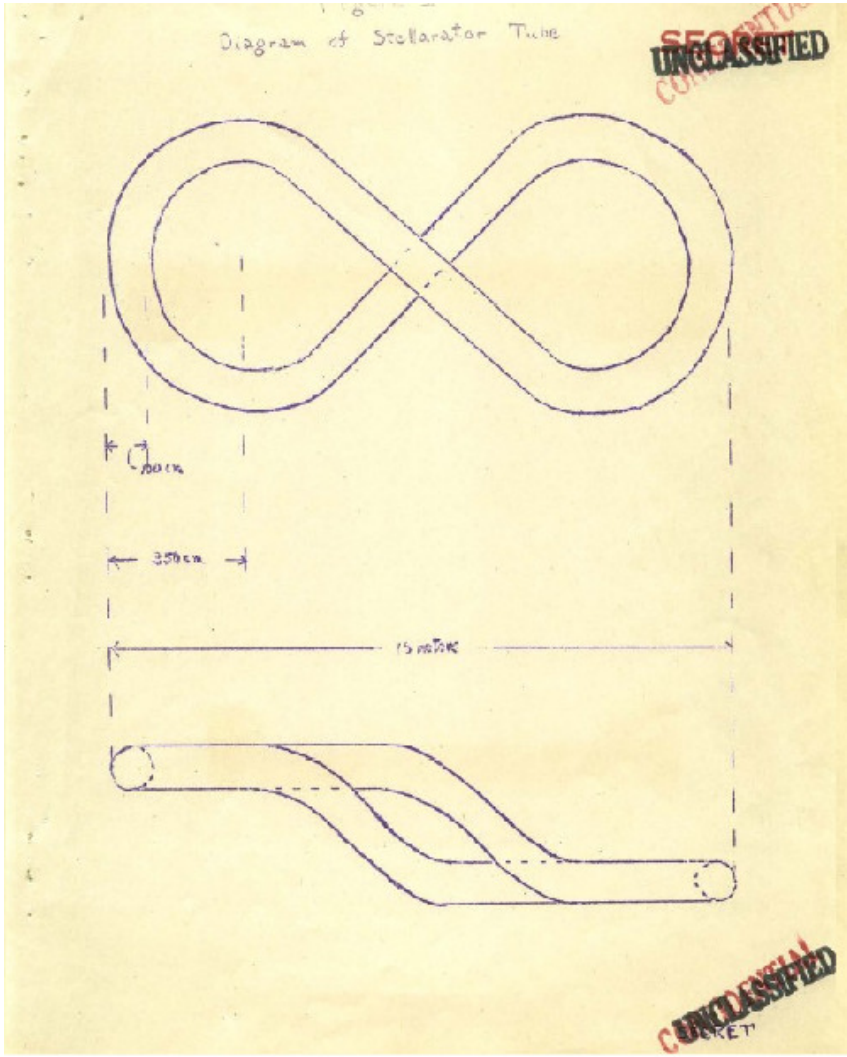
Tokamak

- Tamm & Sakharov 1950



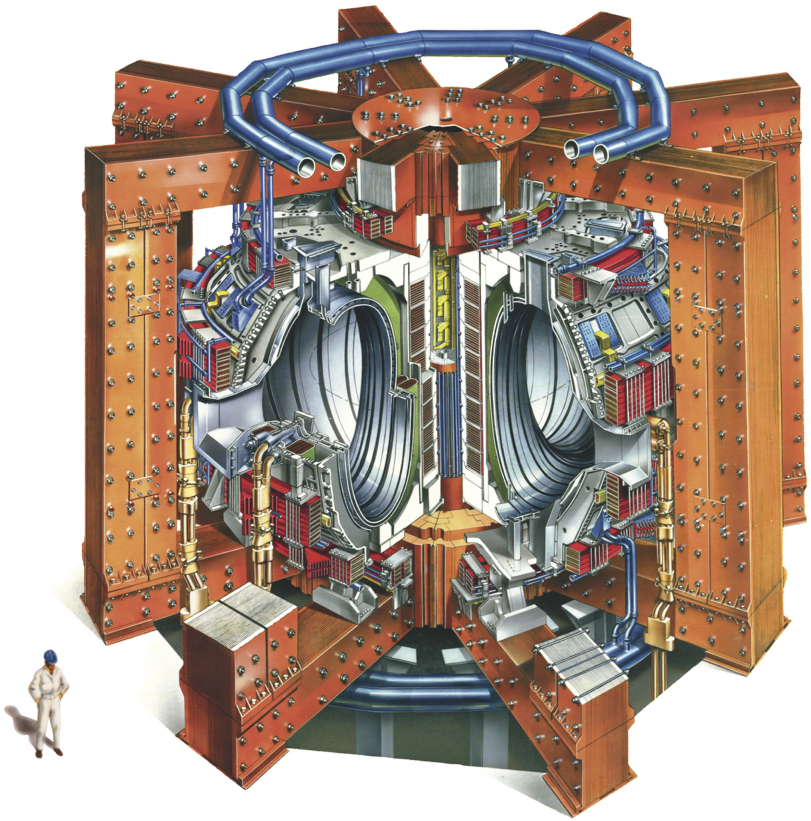
Stellarator

- Spitzer (Princeton) 1951
- Magnetisk inneslutning åstadkoms med yttre spolar.
- Ingen plasmaström.
- Möjlighet för stationärtillstånd.

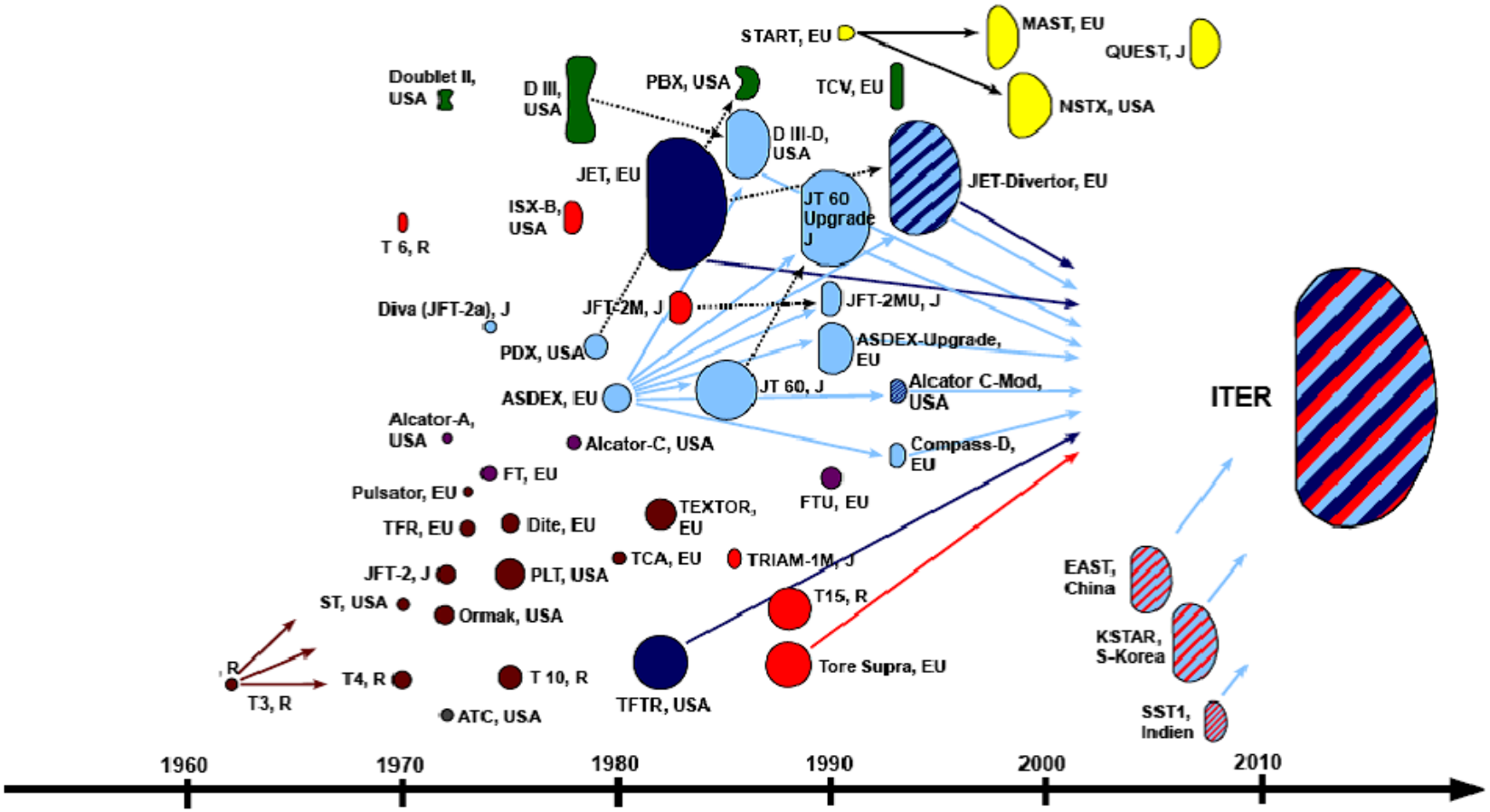


JET (Joint European Torus)

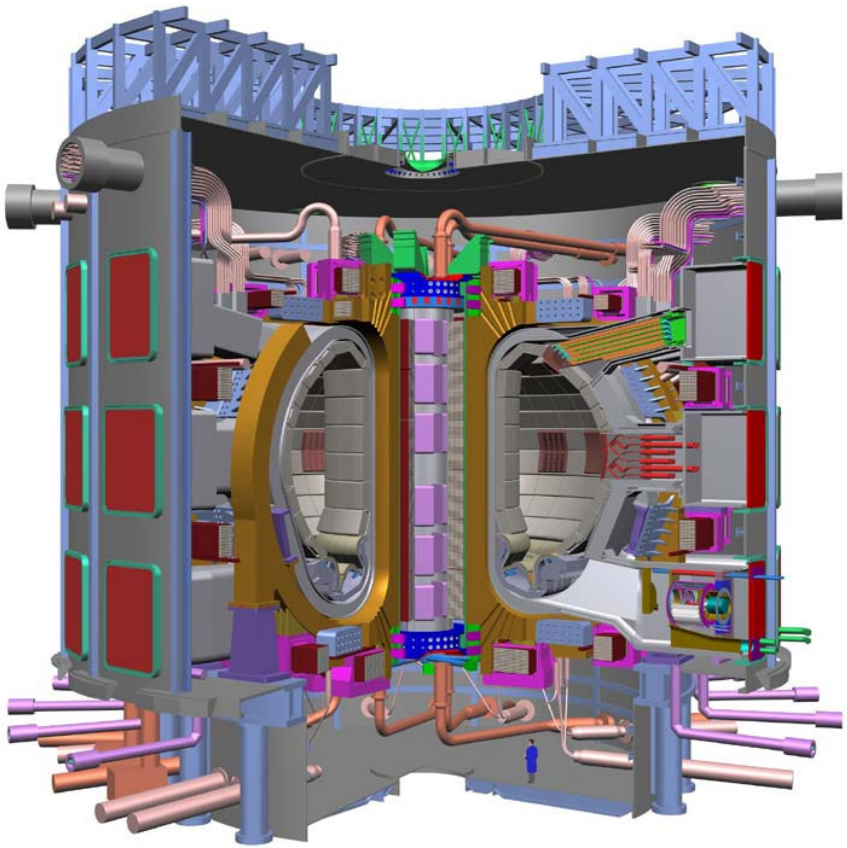
- nära Oxford i England
- startade 1983
- storradien: 3 m
- lillradien: 0.96-2.1 m
- volym: 80-100 m^3
- ström: upp till 5 MA
- magnetfält: upp till 4 T
- världsrekord i producerat fusionseffekt: 16MW
- $P_{ut}/P_{in} = 0.66$



Tokamakens släktträd



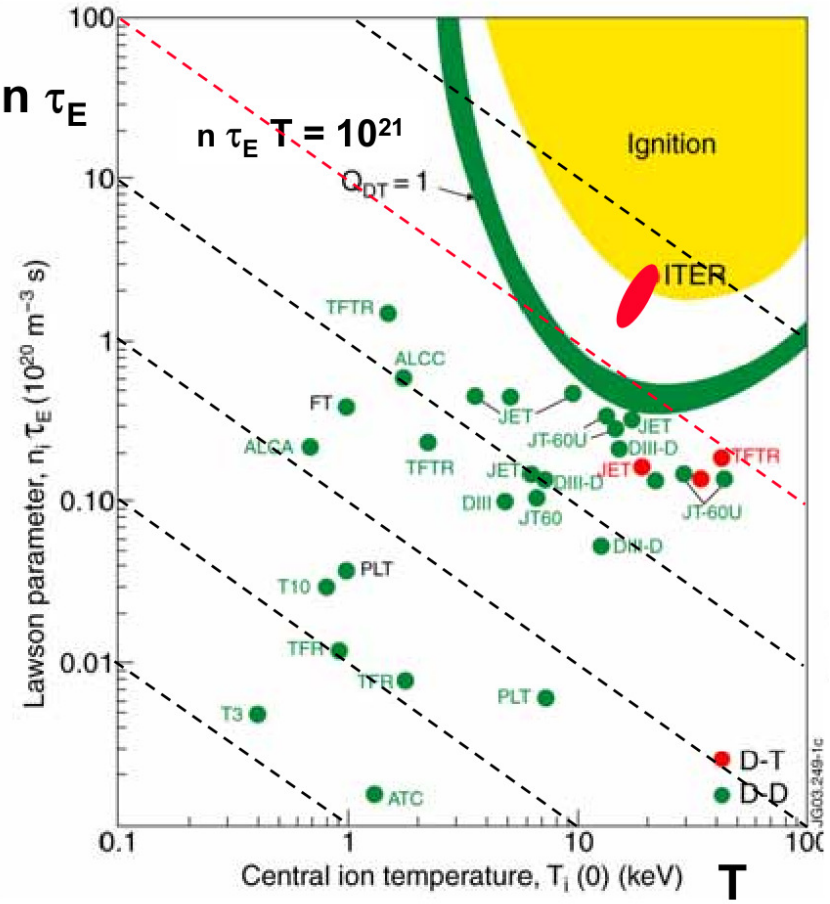
ITER



- Byggs Frankrike (2020)
- $R = 6.2\ \mathrm{m}$, Volym: 840 m^3
- 500 MW, $P_{ut}/P_{in} = 10$

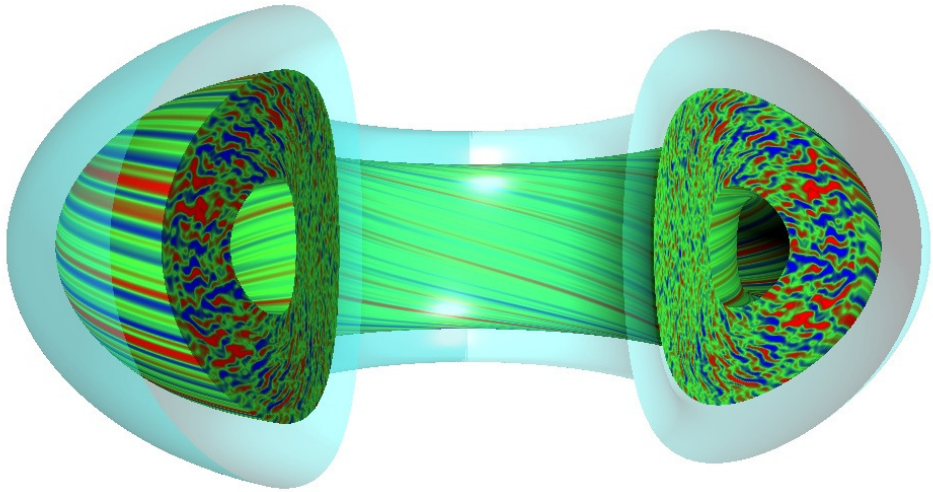
Strävan efter tändning

- Tändning: $Q = P_{ut}/P_{in} = \infty$.
- Att uppnå tändning och en självuppehållande fusionsprocess behövs:
  $T_{min} \simeq 150$ miljoner K
  $(nT\tau_E)_{min} \simeq 5$ atm s



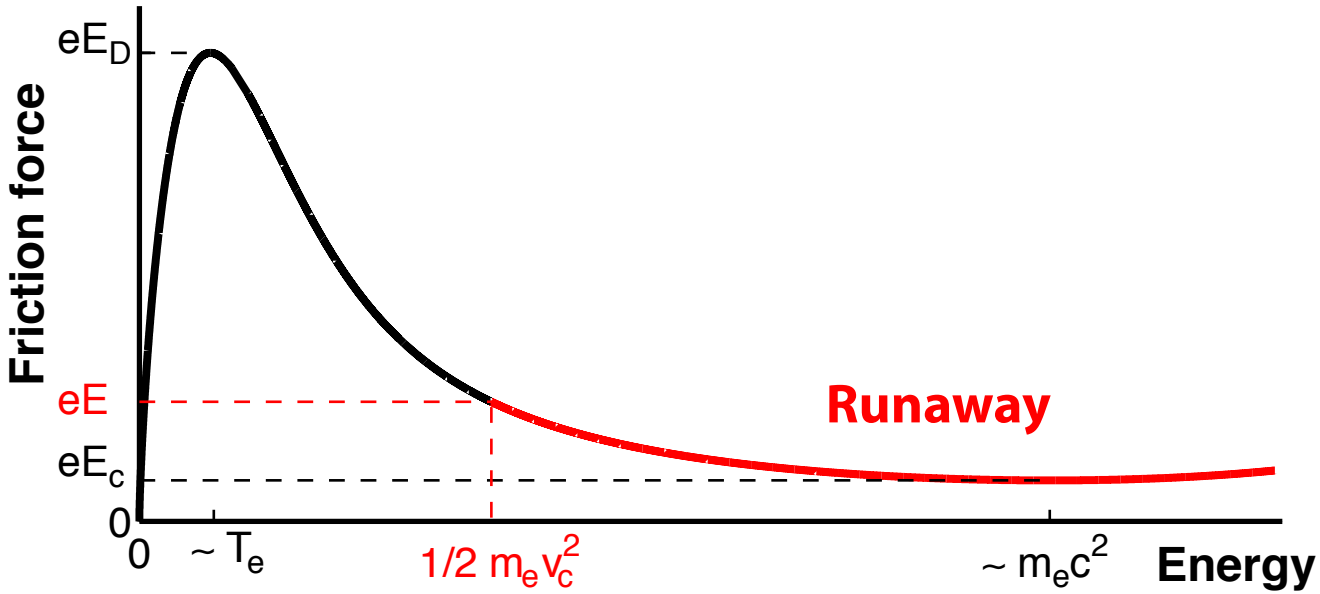
Turbulent transport

- Inneslutningstiden τ_E ökar om den radiella transporten minskar.
- Huvuddelen av transporten orsakas av finskaliga turbulenta fluktuationer - mikroinstabiliteter.
- För mikroinstabiliteters teoretiska beskrivning behövs icke-lineära, multidimensionella kinetiska modeller och numeriska simuleringar.



Densitetsfluktuationer beräknade med turbulenssimuleringspaketet GYRO

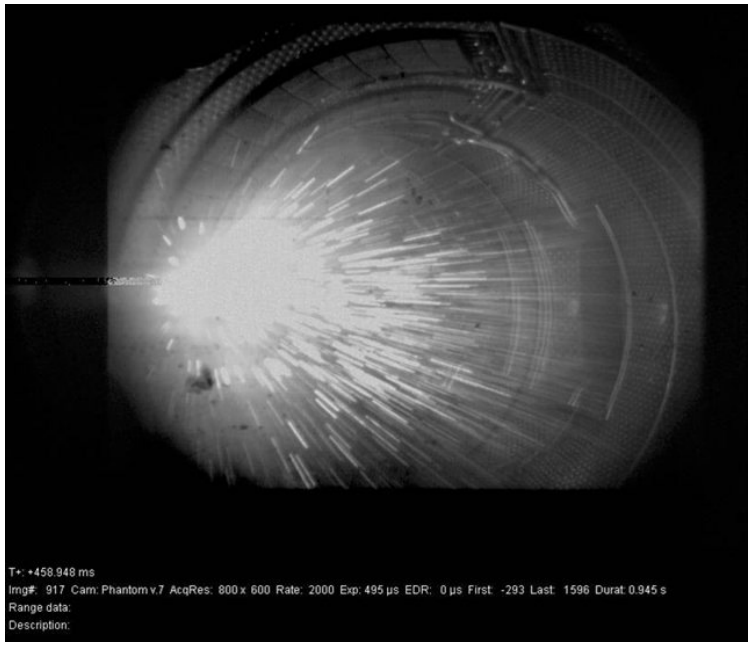
Friktionen



- Elektroner accelereras av ett elektriskt fält och bromsas av kollisioner.
- Över en viss hastighet, minskar friktionen med hastigheten.
- Elektroner skenar iväg när $E > E_c$

Skenande elektroner i disruptioner

- plasmat kyls snabbt
- resistiviteten ökar
- ett starkt elektriskt fält uppstår
- det accelererar elektroner
- strömmen kan omvandlas till en elektronstråle bestående av elektroner med energier runt 10-20 MeV



Kolpartiklar lösgörs från väggen när skenande elektroner träffar väggen i Tore Supra tokamaken.

Forskning om skenande elektroner i tokamaker

Förutse och undvik

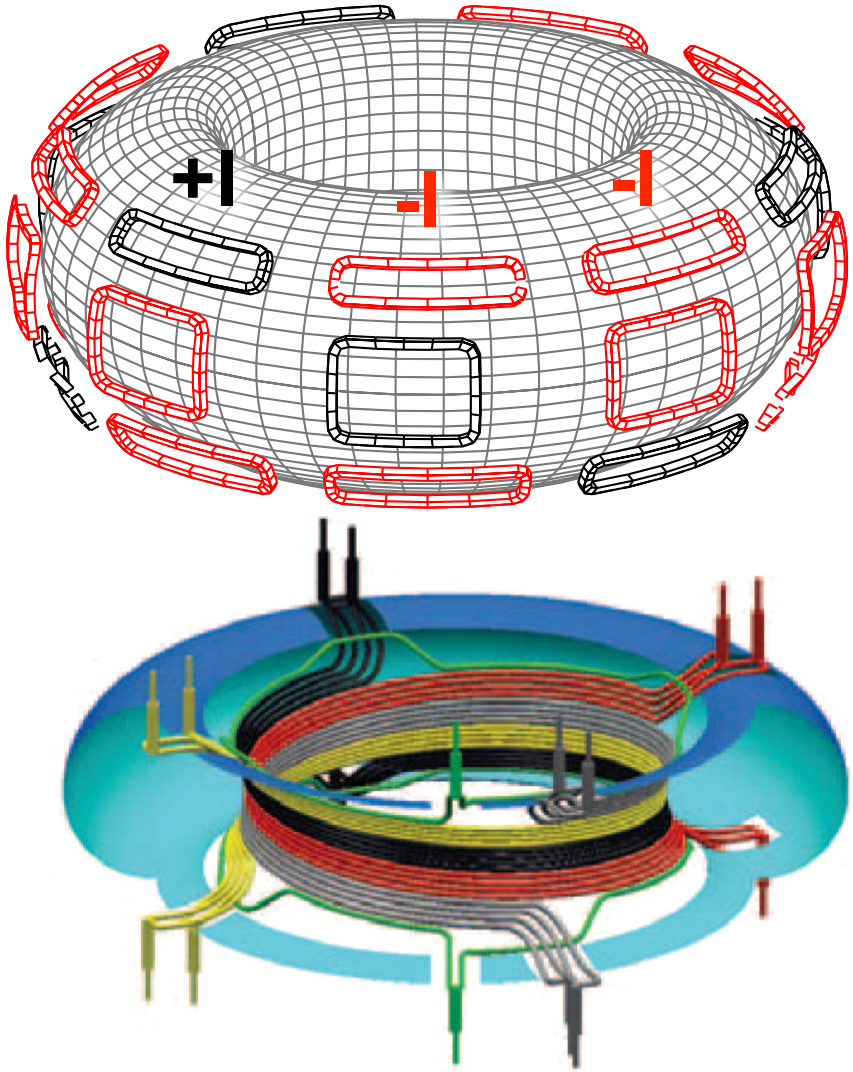
- Kan vi kontrollera skenande elektroner?

Hantera konsekvenserna

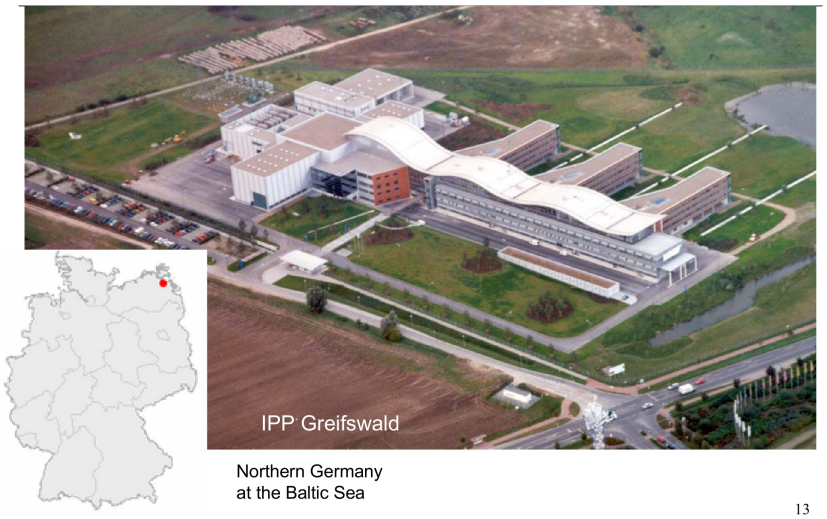
- Vilka är effekterna och hur kan dessa hanteras?

Magnetiska perturbationer

- Plasmat består av laddade partiklar inneslutna av magnetfält.
- Förstör magnetfältet (bara litegrann), med externa magnetfältspolar.
- Påverka inneslutningen (bara litegrann).
- Snabba elektroner transporteras bort innan det blir “avalanche”.

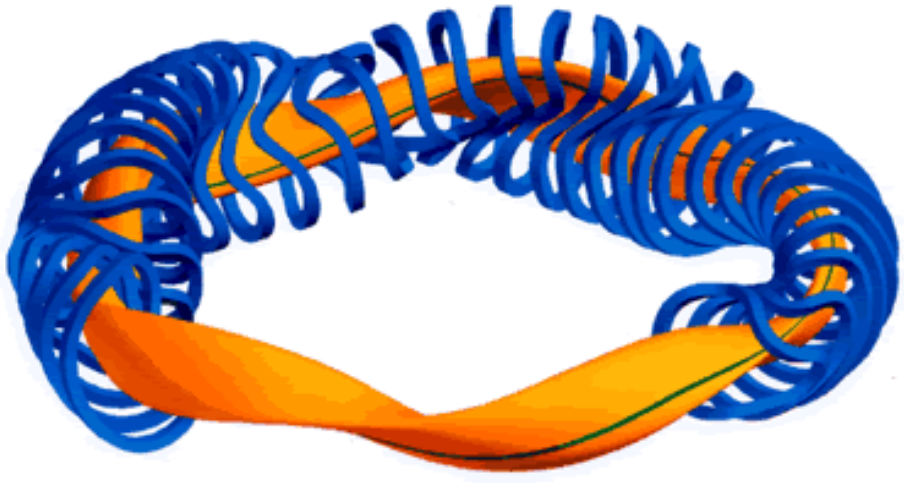


Stellarator

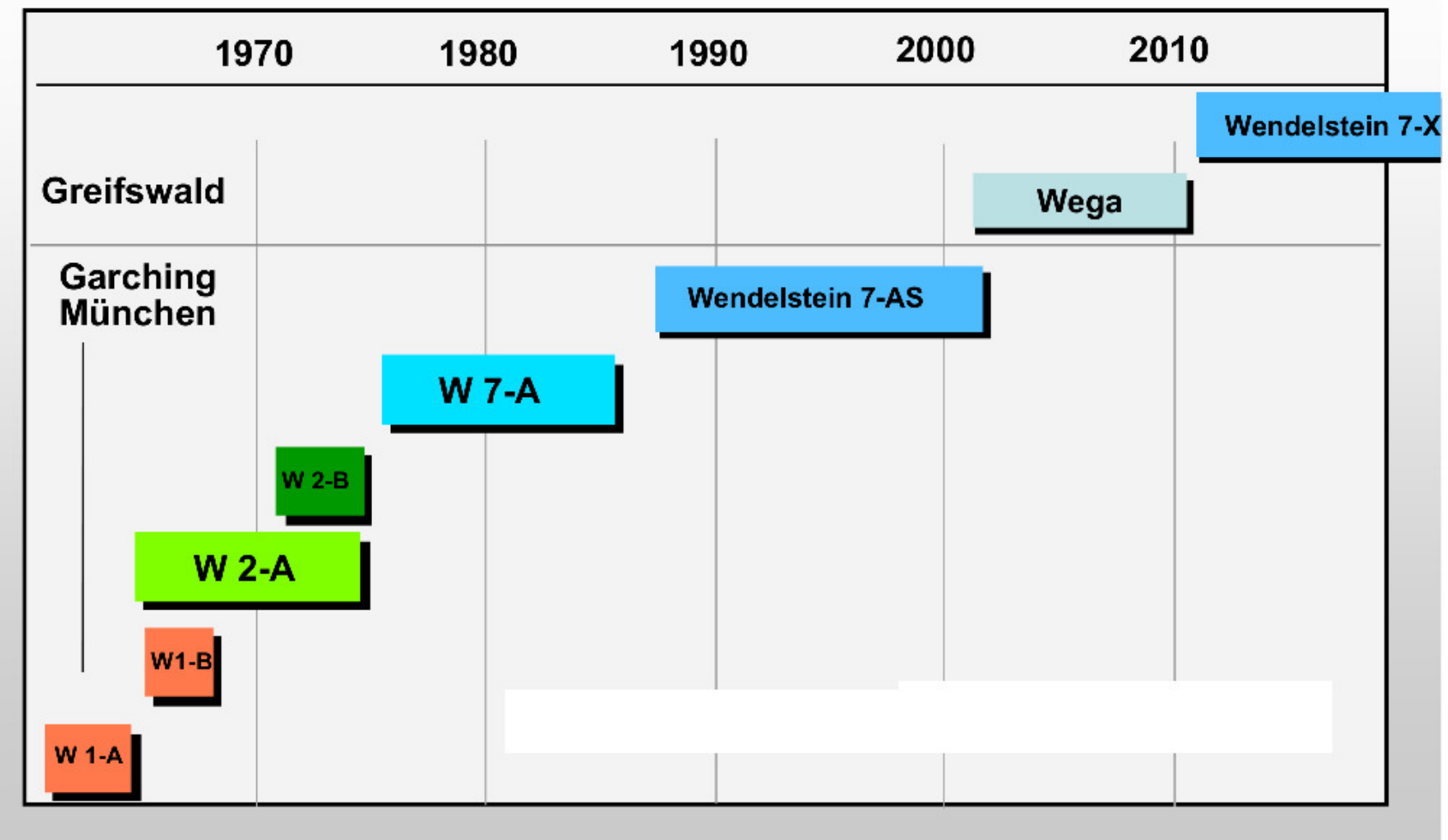


- Wendelstein 7-X i Tyskland (2015)

- $R = 5.5\ \mathrm{m}$, Volym: 30 m^3

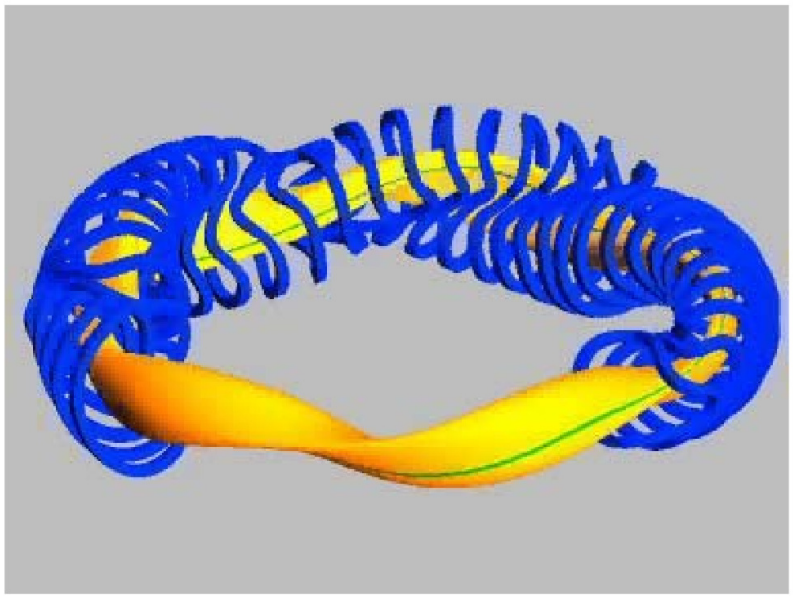


Wendelstein stellaratorer

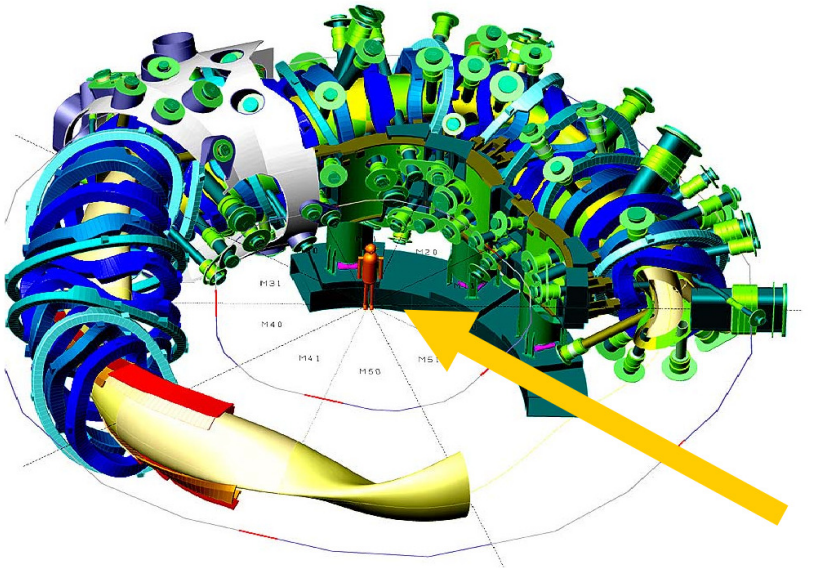


Fysik vs. ingenjörsvetenskap

Physicists' dream



Engineers' nightmare



outer diameter: 16 m

Spännande tider

- Fusionsforskningen är i en ny fas nu när det konstrueras
  - medelstora supraledande tokamaker i Kina, Indien, Korea och Japan
  - ITER i Frankrike
  - Wendelstein 7-X i Tyskland
- ITER ska förhoppningsvis demonstrera storskalig fusionsenergiproduktion.

Sammanfattning

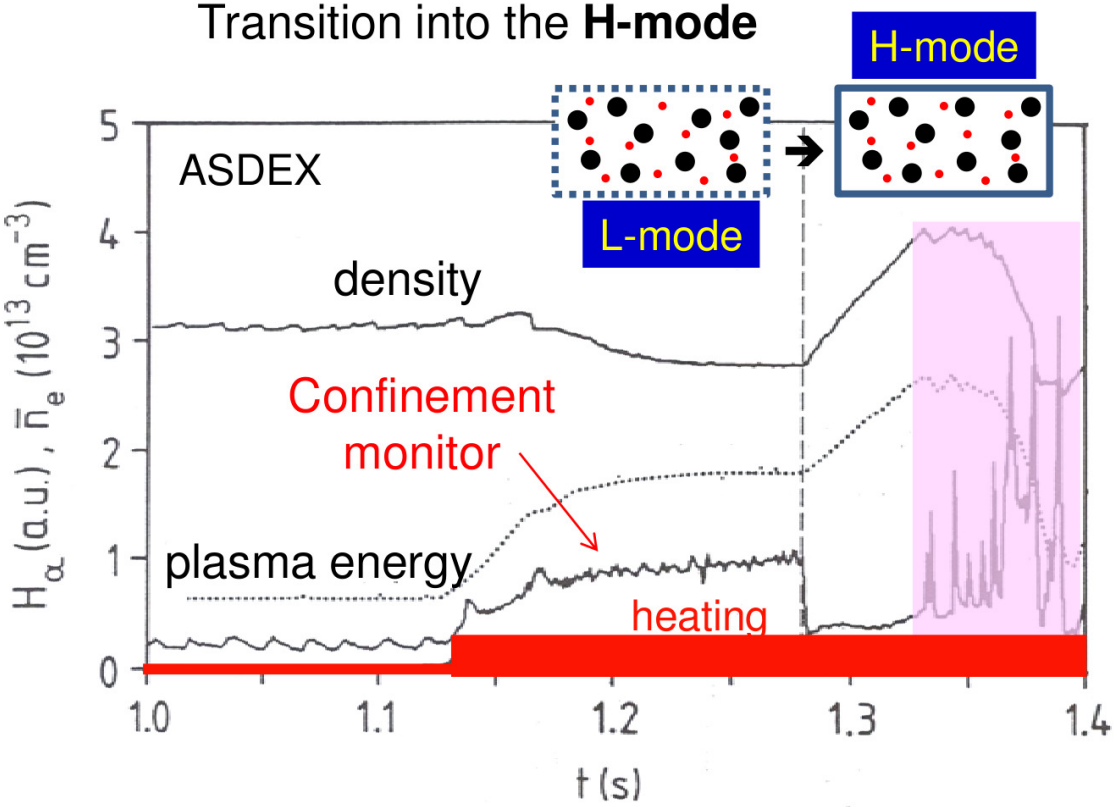
- Energibehovet är enormt!
- Förändring tar tid och parallella vägar är nödvändiga.
- Fusion har fördelar när det gäller resurser, miljöpåverkan, säkerhet och avfall.
- Fusionsplasmafysik har kommit långt men stora utmaningar kvarstår.
- Energiforskning är interdisciplinärt, med matematiken som gemensamt nämnare.
- Matematik är strategiskt viktigt.

Spare slides

Viktigt genombrott

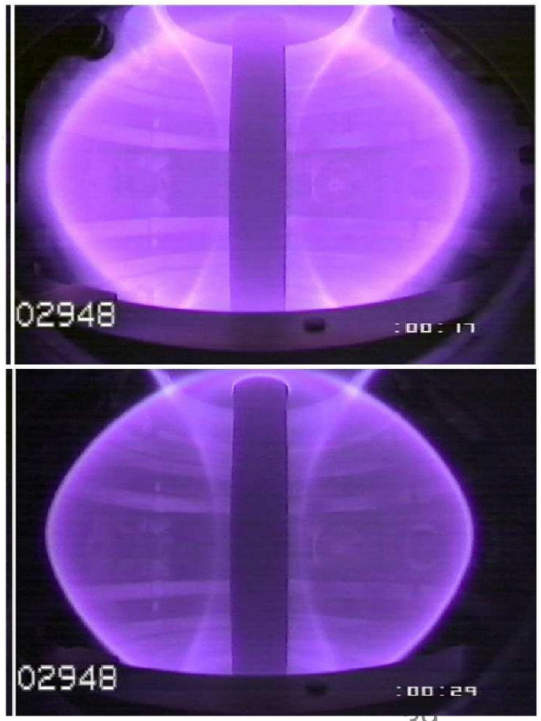
Tokamaks and stellarators bifurcate spontaneously to good confinement

Transition into the **H-mode**



The energy confinement τ_E doubles

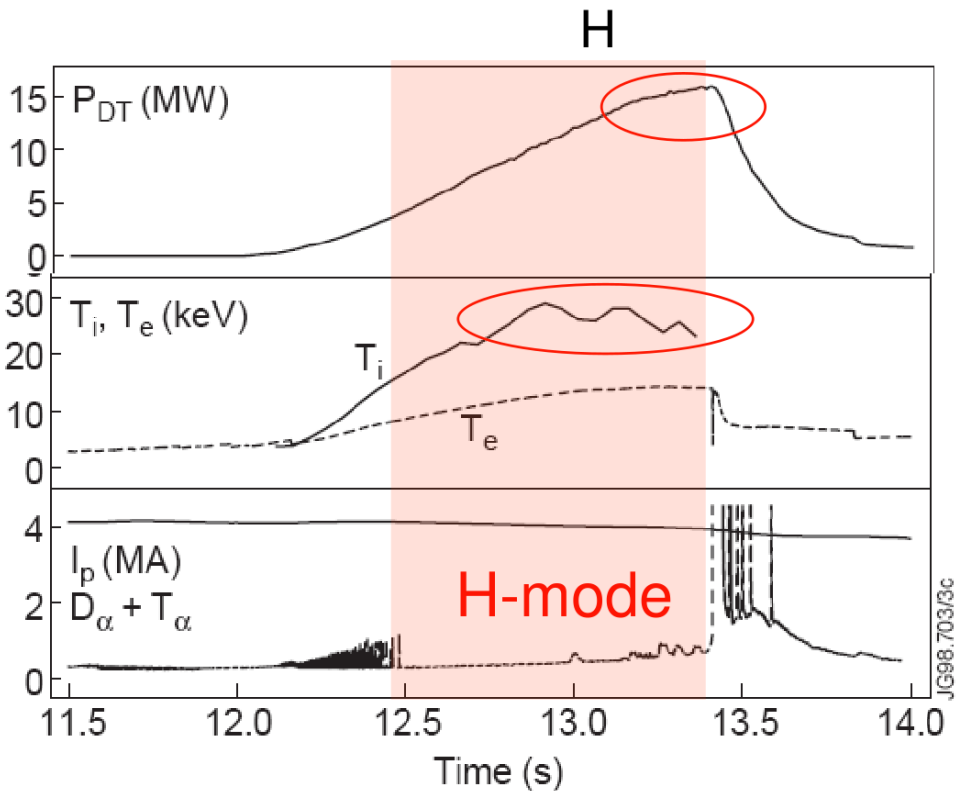
Turbulence disappears at the plasma edge



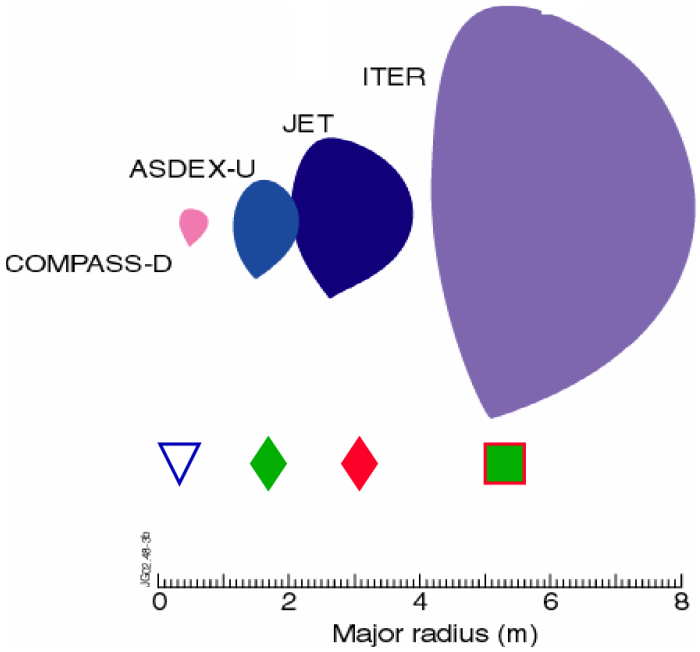
MAST, UKAEA

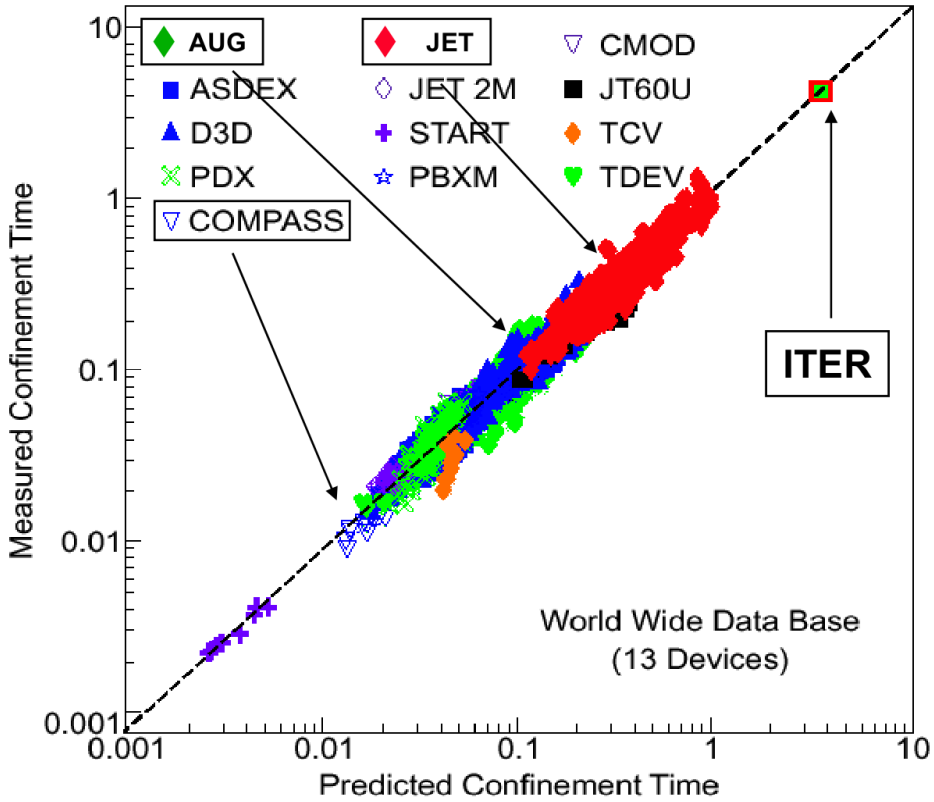
H-moden i JET gav goda resultat

The 16.1 MW DT discharge of JET at Q ~ 0.65 in the H-mode



Inneslutningstid är förutsägbart





$$\tau_E^H \propto \frac{\epsilon^{0.74}}{q^3} \frac{a^{2.67}\kappa^{3.29}B^{3.48}A^{0.61}}{n^{0.91}T^{2.23}}$$

Shall I refuse my dinner because I do not fully understand the process of digestion?"

Oliver Heaviside

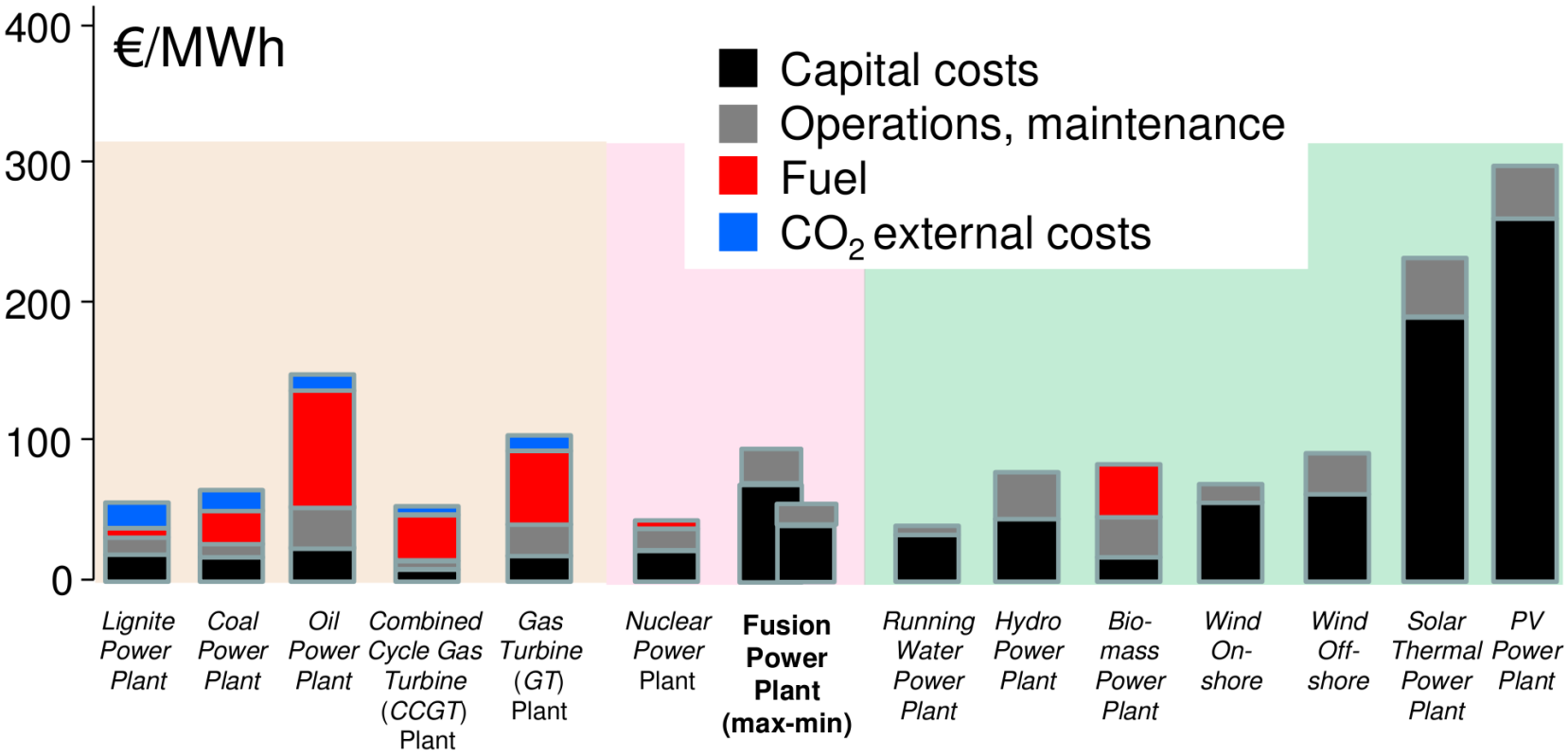
Miljöeffekter

- Fusionsreaktioner producerar inte CO_2 eller andra växthusgaser.
- Ingen utsläpp av farliga kemikalier.
- Reaktionsprodukten helium är helt ofarlig.
- Största problemet: neutronet från DD eller DT reaktionen. Fångas i väggen (kommer inte ut). Men väggmaterialet blir radioaktivt.
- Radioaktiviteten har kort halveringstid (mindre än 100 år).
- Avancerade material ger upphov till mindre mängd avfall med kortare halveringstid.

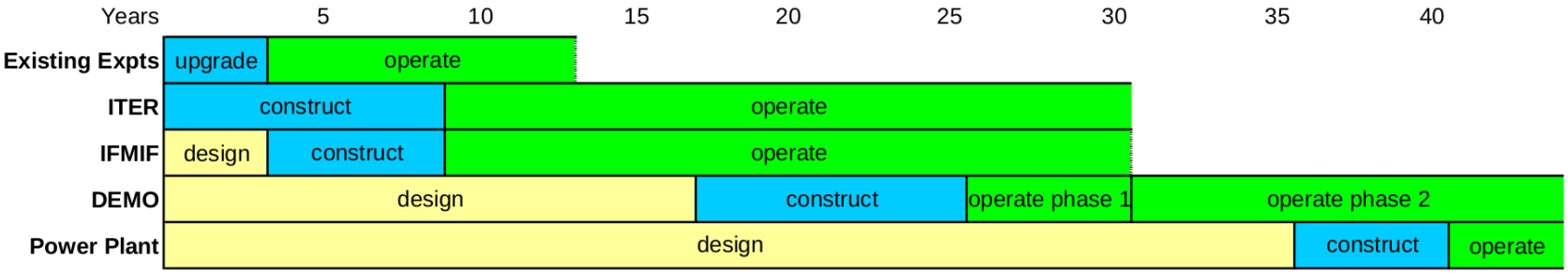
Säkerhet

- Härdsmälta omöjlig.
- Mängden bränsle i reaktorn är mycket liten $\rightarrow$ energin som kan frigöras i en eventuell olycka är väldigt liten.
- Värmeförlusterna ökar monotont med temperaturen och fusionseffekten har ett maximum, vilket innebär att plasmats temperatur kan inte växa över ett visst värde.
- Väggens radioaktivitet kan hållas vid låga nivåer.

Kostnaden

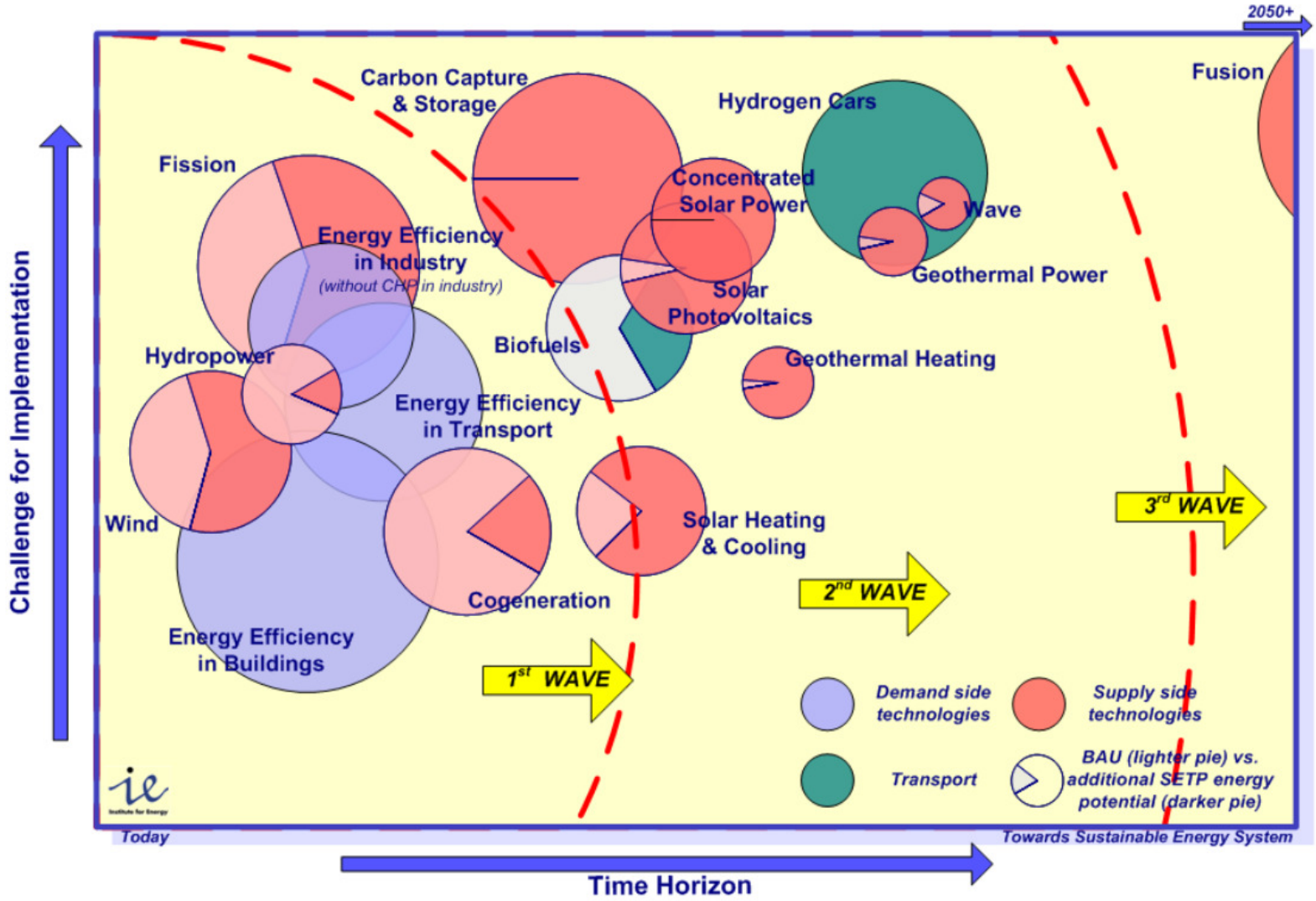

400
300
200
100
0
€/MWh
Capital costs
Operations, maintenance
Fuel
CO_2 external costs
Lignite Power Plant
Coal Power Plant
Oil Power Plant
Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) Plant
Gas Turbine (GT) Plant
Nuclear Power Plant
Fusion Power Plant (max-min)
Running Water Power Plant
Hydro Power Plant
Bio-mass Power Plant
Wind On-shore
Wind Off-shore
Solar Thermal Power Plant
PV Power Plant

Hur lång tid tar det?



"Fusion will be ready when society needs it." –Lev Artsimovich

Fusion är på kartan!



European Strategic Energy Technology Plan (European Commission, Dec 2007)