

Fusione nucleare: l'energia delle stelle sulla Terra -25 maggio 2020-

Fulvio Auriemma

Consorzio RFX (CNR, ENEA, UNIPD, INFN, Acciaierie Venete)

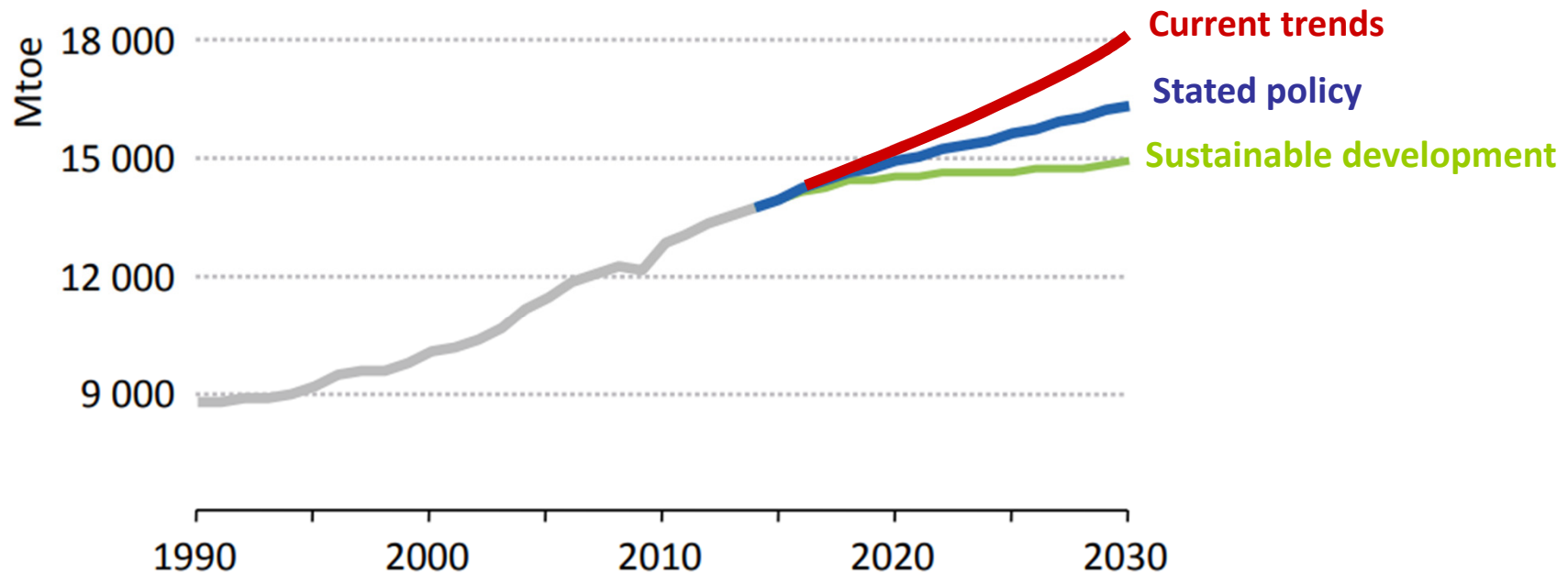
Corso Stati Uniti 4, Padova, I-35127

fulvio.auriemma@igi.cnr.it

fulvio.auriemma@unipd.it

- **Questione energetica:** perché studiare la nuove fonti di energia?
- Come avviene il processo di **fusione tra nuclei**?
- È possibile riprodurlo e sfruttarlo sulla terra?
- Qual è lo stato attuale della **ricerca** fusionistica nel mondo?
- Il prossimo passo: **ITER**
 - Il contributo italiano e padovano

Consumo di energia primaria al mondo



La pressione demografica e il miglioramento della qualità di vita dei paesi sottosviluppati porterà as un incremento della domanda di energia primaria

3 scenari studiati:

Current trends – se non facciamo niente

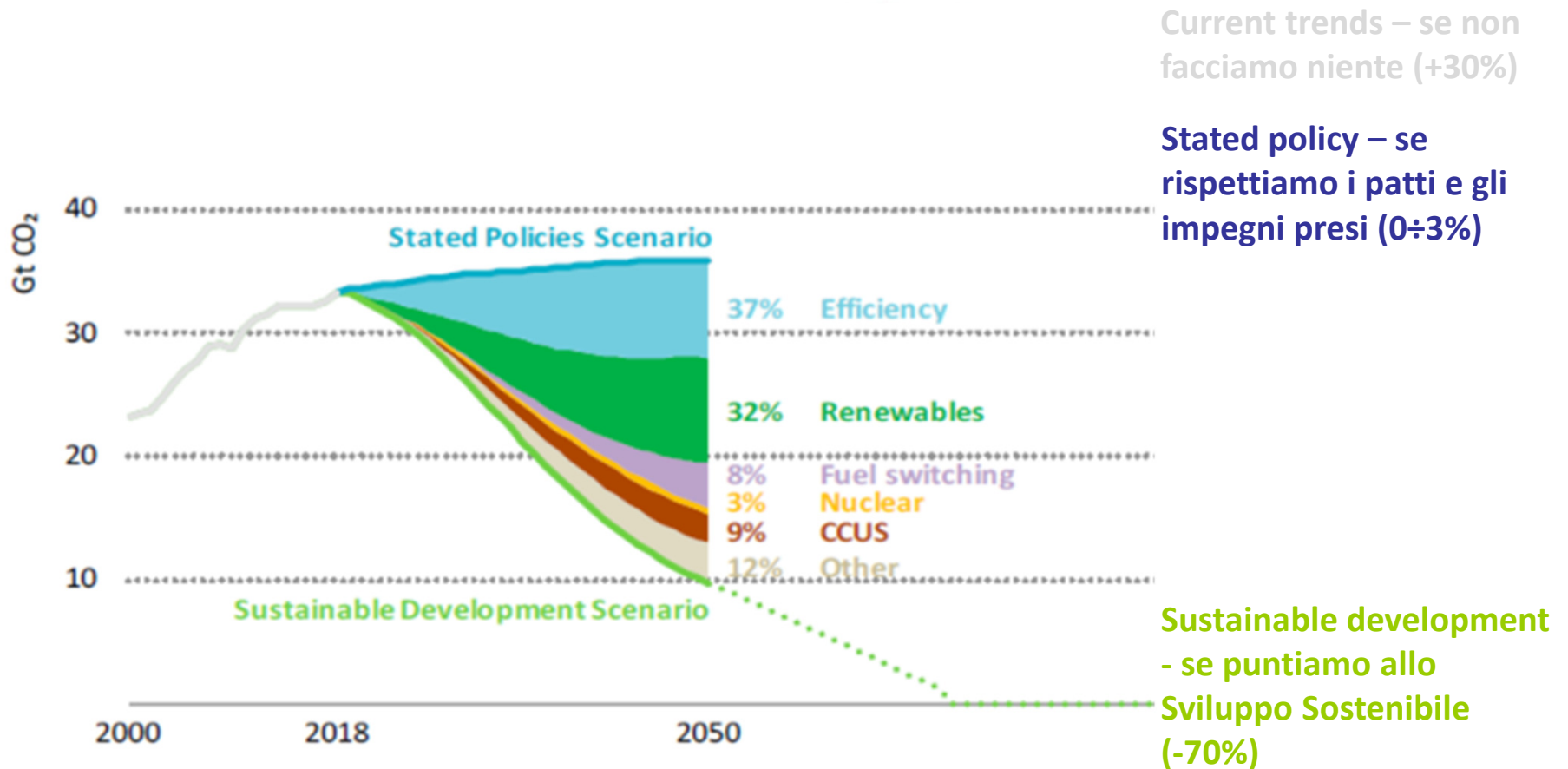
Stated policy – se rispettiamo i patti e gli impegni presi

Sustainable development - se puntiamo allo Sviluppo Sostenibile (per raggiungere gli obiettivi di COP21: $\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$)

Mtoe: milioni di tonnellate di petrolio equivalenti

CO₂ in atmosfera: confronto tra gli scenari

Energy-related CO₂ emissions & reductions in the Sustainable Development Scenario
 World Energy Outlook 2019

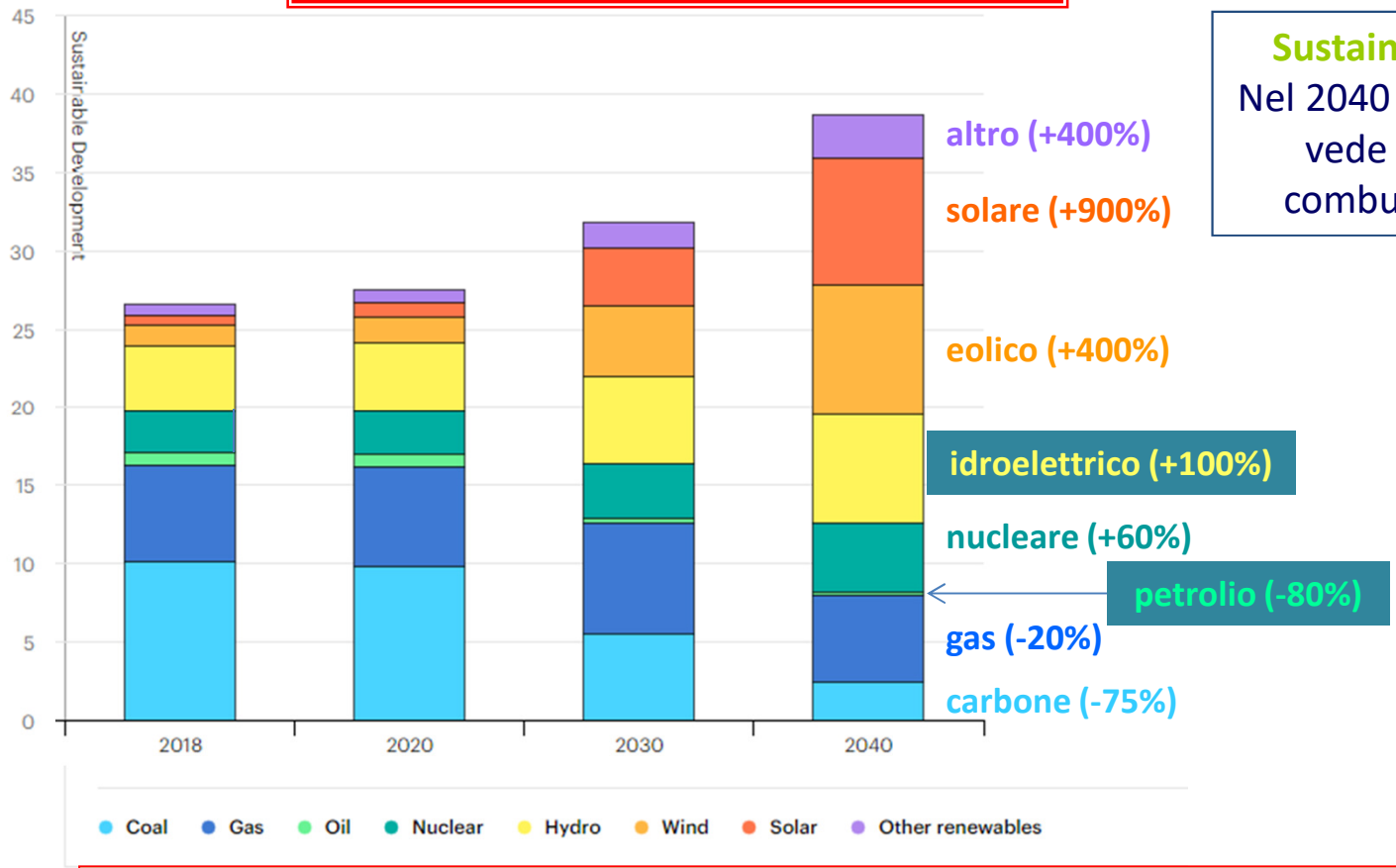


Fonte: OECD/IEA 2019 World Energy Outlook, IEA Publishing. Licence: www.iea.org/t&c

Scenario energetico per il futuro – energia elettrica

$\Delta T < 2^\circ\text{C}$ nel 2040 - CO_2 450 ppm

thousand TWh



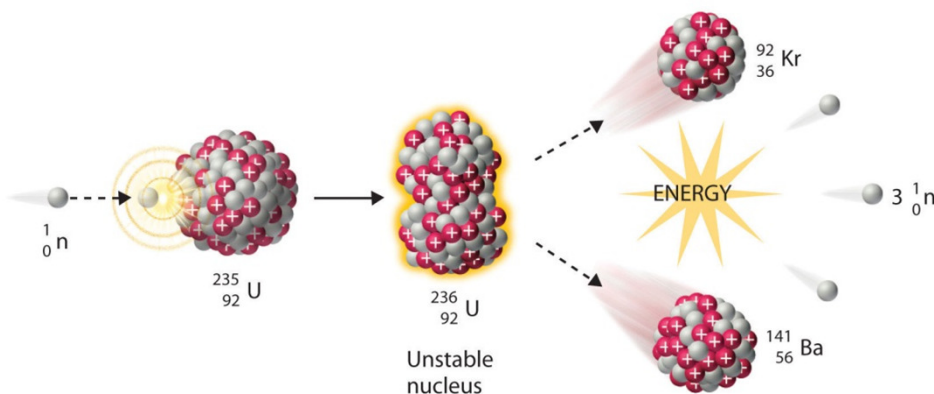
Sustainable development
 Nel 2040 il paniere energetico vede ancora presenti i combustibili fossili (25%)

Necessità di differenziare più possibile le diverse fonti, con contributo maggiore del 50% di fonti low-carbon:
non possiamo trascurare nessuna alternativa!

- **Questione energetica:** perché studiare la nuove fonti di energia?
- Come avviene il processo di **fusione tra nuclei**?
- È possibile riprodurlo e sfruttarlo sulla terra?
- Qual è lo stato attuale della **ricerca** fusionistica nel mondo?
- Il prossimo passo: **ITER**
 - Il contributo italiano e padovano

L'energia nucleare oggi e domani

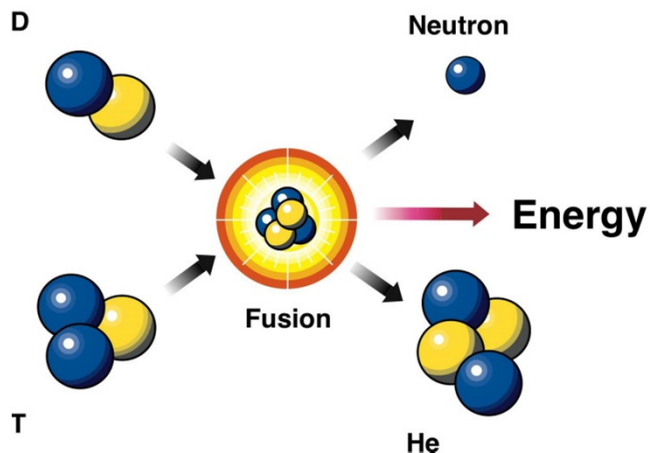
Fissione



- ✓ Non produce CO₂
- ✓ Costo competitivo con i combustibili fossili
- ✗ Esaurimento scorte di combustibile
- ✗ Scorie radioattive e materiali attivati (da 1.000 a 1.000.000 di anni circa)

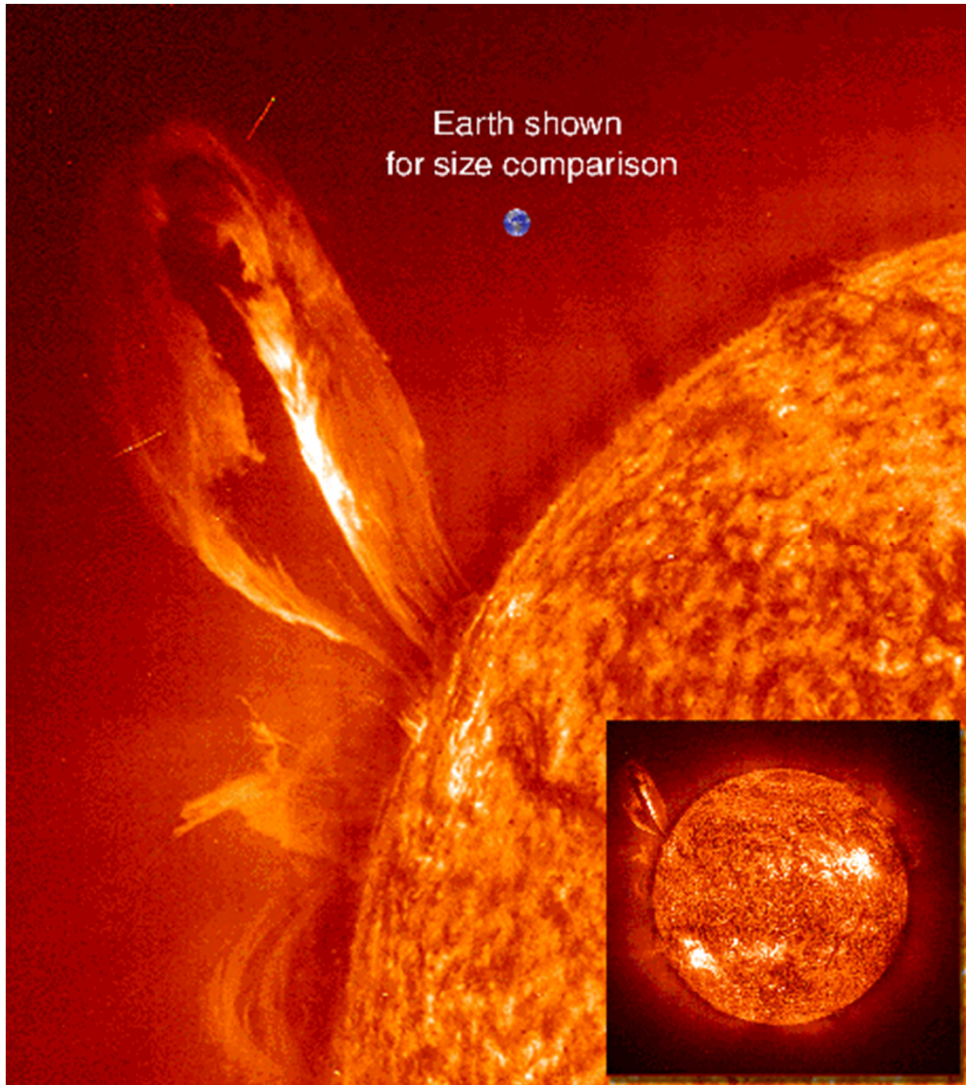
$E = mc^2$

Fusione



- ✓ Non produce CO₂
- ✓ Disponibilità elevata di reagenti
- ✓ Intrinsecamente sicura
- ✓ Sostanziale assenza di radioattività
- ✗ È ancora in fase sperimentale
- ✗ Innesco e controllo della reazione

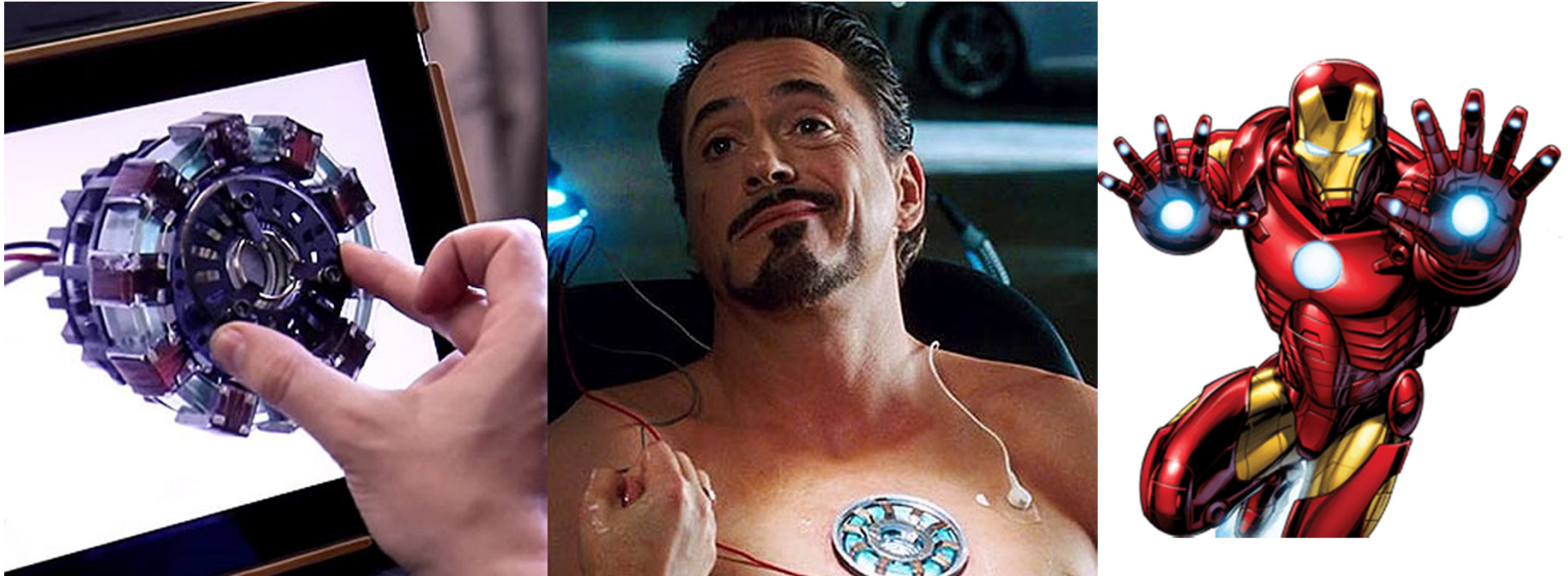
La fusione nucleare in natura...



In natura la fusione nucleare funziona già bene.

L'energia nel sole è fornita da processi di fusione che bruciano 600 milioni di tonnellate di idrogeno al secondo.

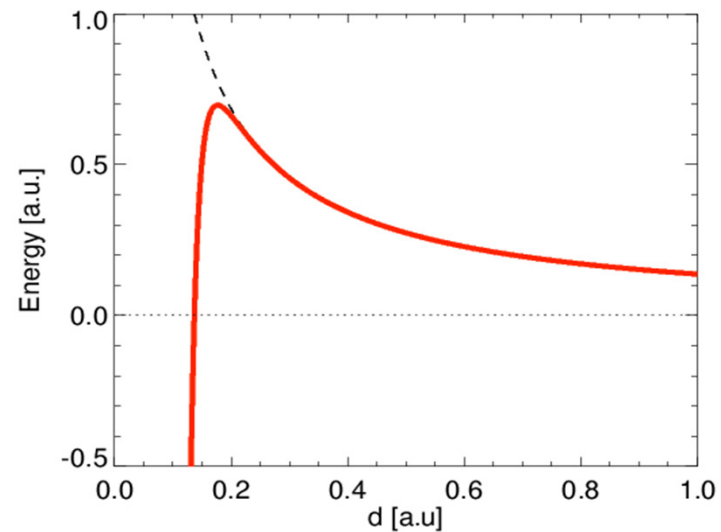
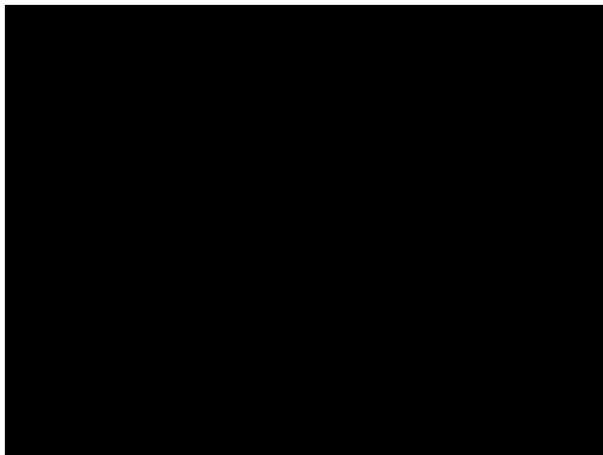
... e sulla Terra.



e no! Qualcosa di piu' realistico

Come avviene la fusione?

- I nuclei carichi positivamente si respingono; aumentando la loro **energia cinetica** (ovvero la loro temperatura) essi possono avvicinarsi, superando la barriera coulombiana e quindi fondersi, grazie alle forze nucleari.



Temperature:

SOLE – 15 milioni di gradi (1 keV)
REATTORE – 150 milioni di gradi (10 keV)

A tali temperature la materia si trova nello stato di PLASMA

Fusione in laboratorio: confinamento

Il plasma caldo non deve toccare le pareti del reattore

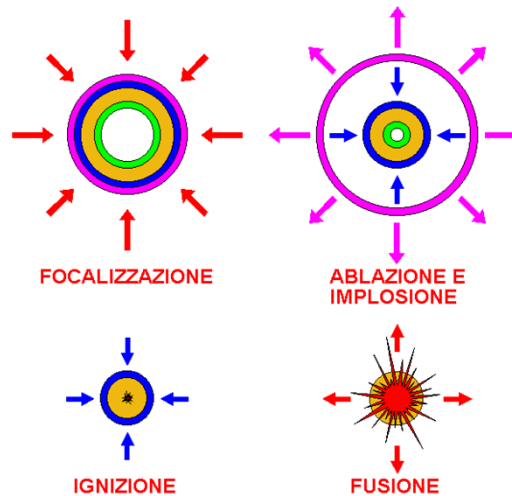
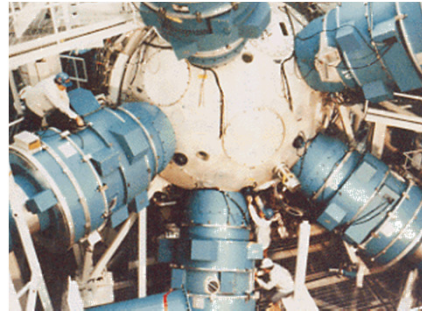
Confinamento gravitazionale:

- compressione gravitazionale
- Ignizione: fusione nucleare
- Equilibrio: $p_k = p_g$



Confinamento inerziale:

- compressione adiabatica
- Ignizione
- $p_k \gg p_i$



Fusione in laboratorio: confinamento

Il plasma caldo non deve toccare le pareti del reattore

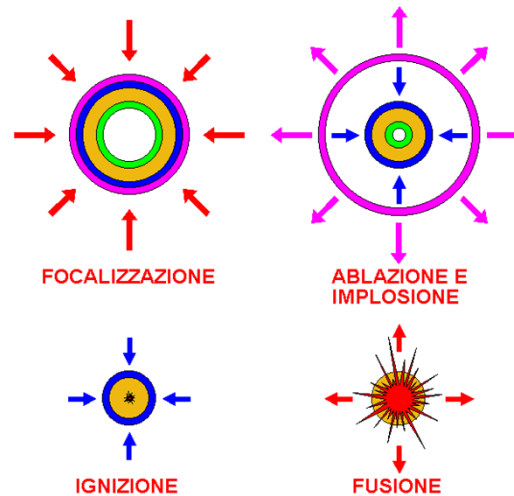
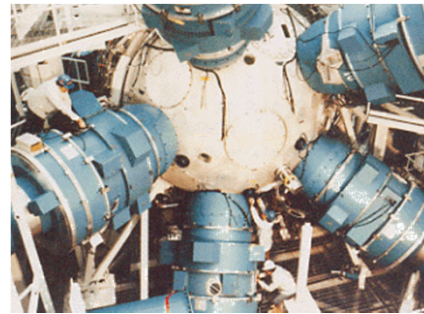
Confinamento gravitazionale:

- compressione gravitazionale
- Ignizione: fusione nucleare
- Equilibrio: $p_k = p_g$



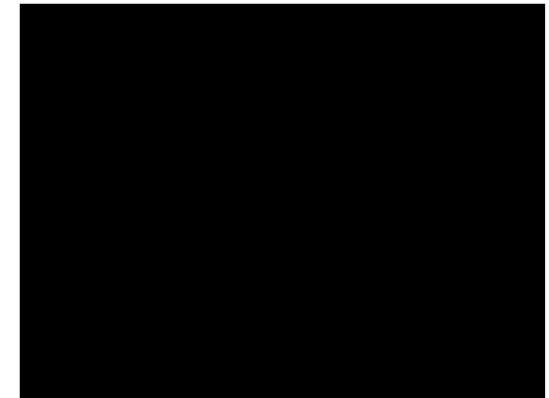
Confinamento inerziale:

- compressione adiabatica
- Ignizione
- $p_k \gg p_i$



Confinamento magnetico:

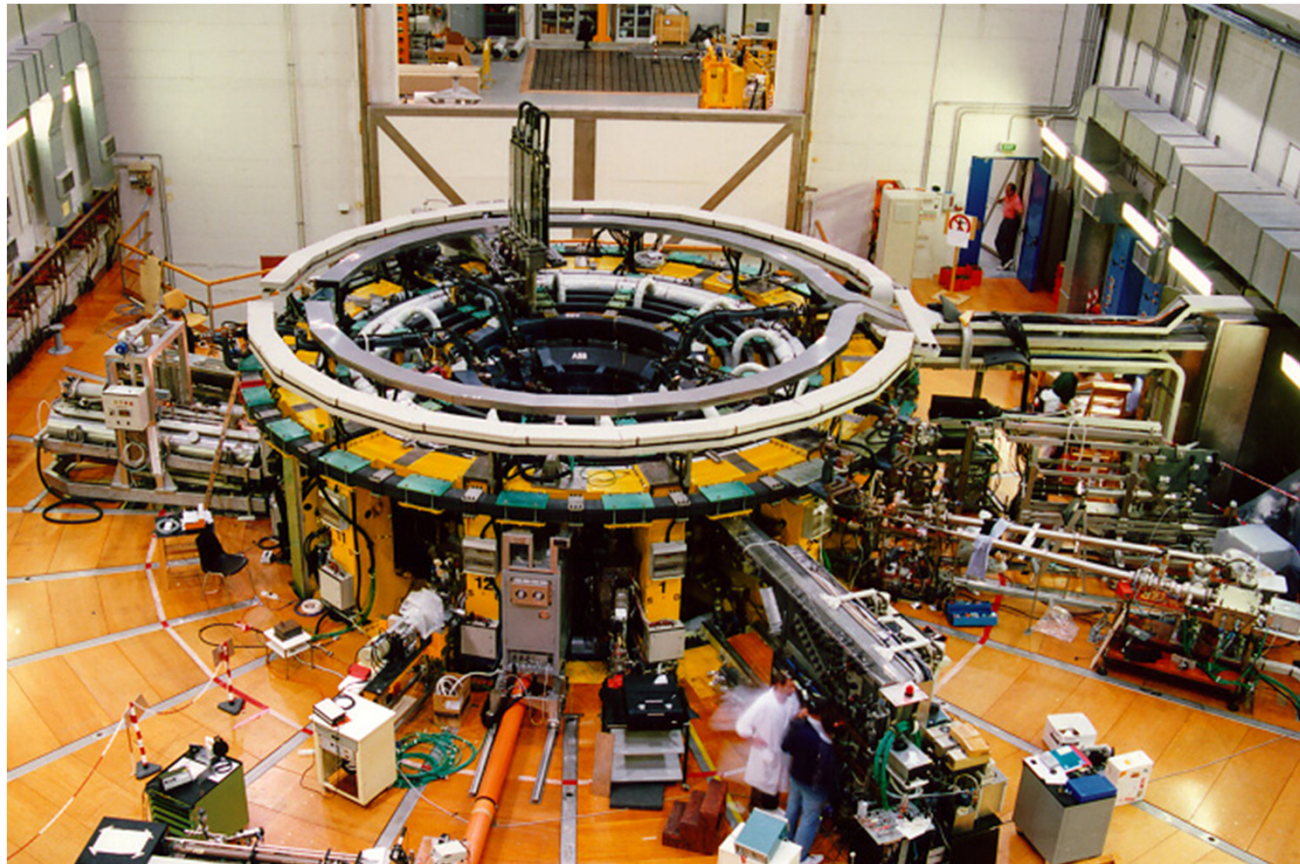
- Forza di Lorentz: $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
- Riscaldamento attivo
- $p_k \ll p_M$



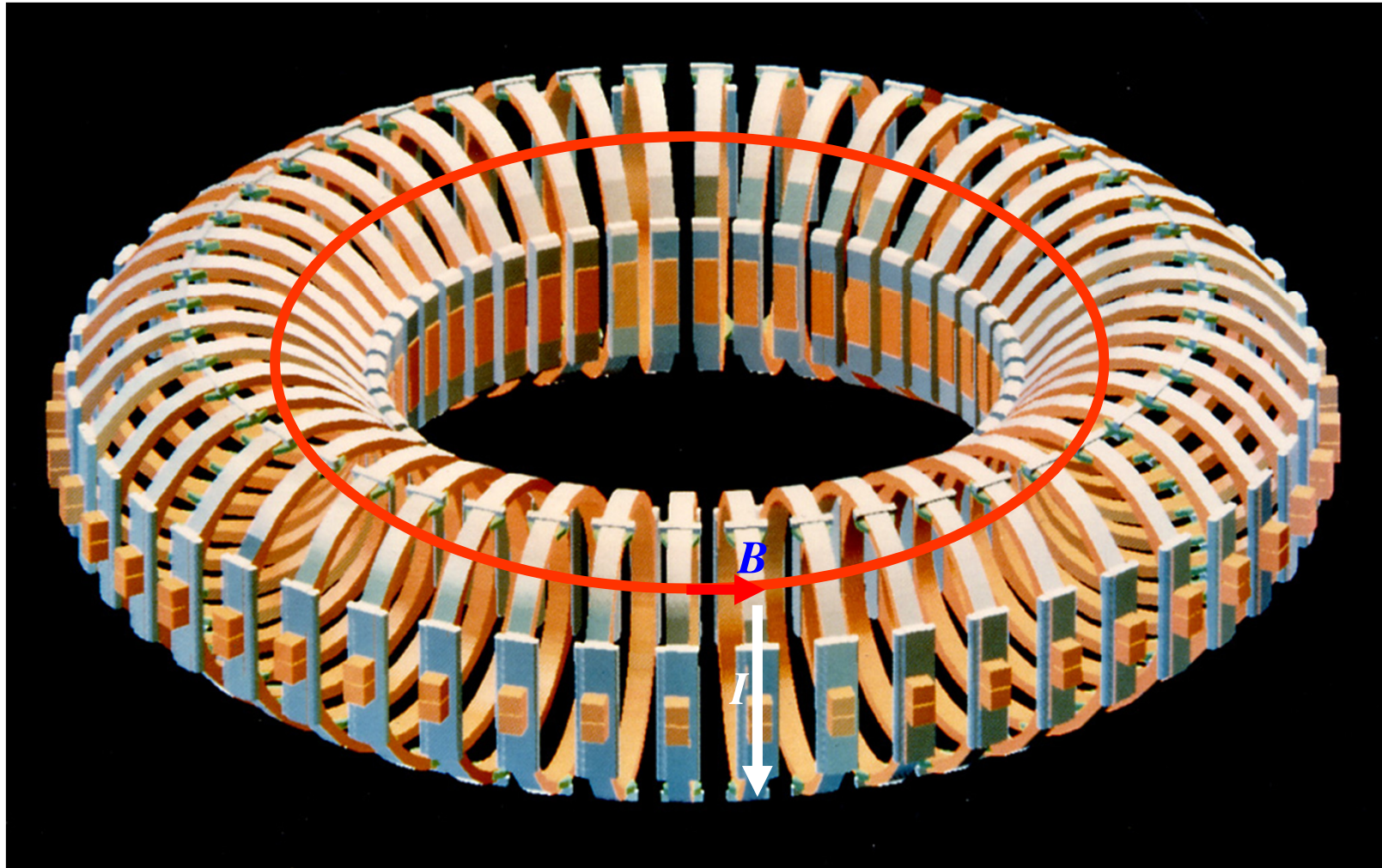
Confinamento magnetico

Il vero contenitore è il **campo magnetico**

Linee di campo di forma opportuna:
CIAMBELLA o TORO

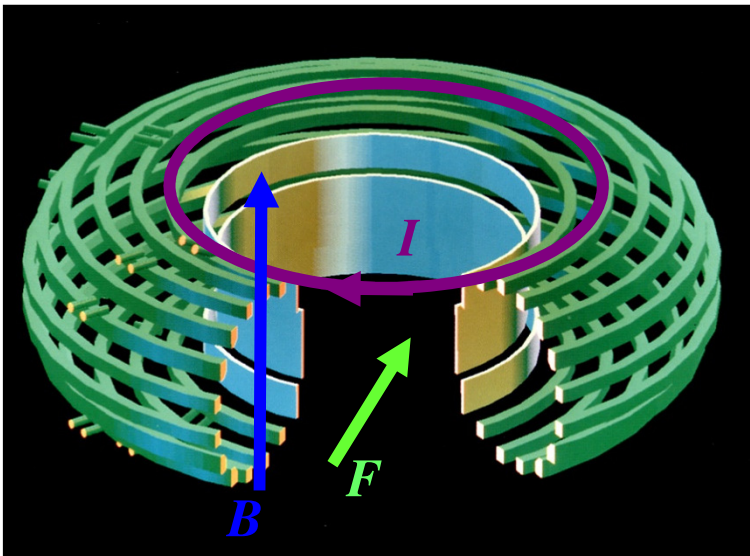


Avvolgimento Toroidale (TC: toroidal coils)



Controllo: posizione (PF: Poloidal Field) + instabilità magnetiche (SC: saddle coils)

Posizione

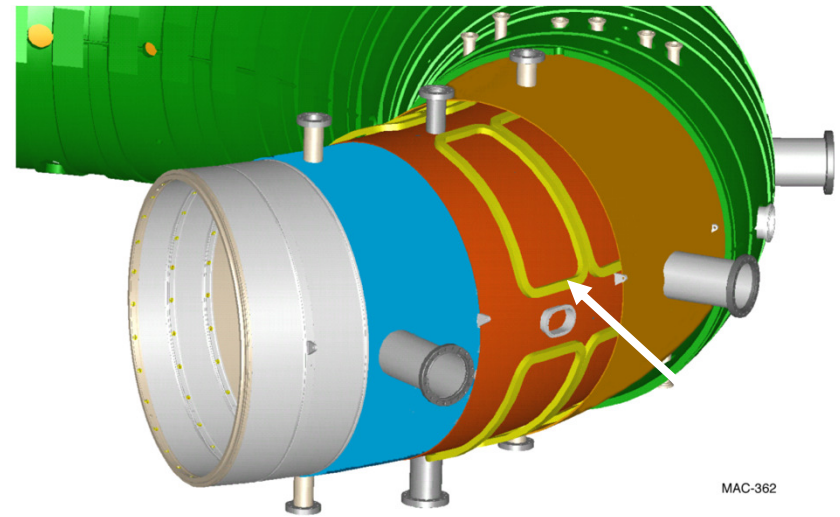


Posizione del plasma

$$\vec{dF} = i \vec{dl} \times \vec{B}$$

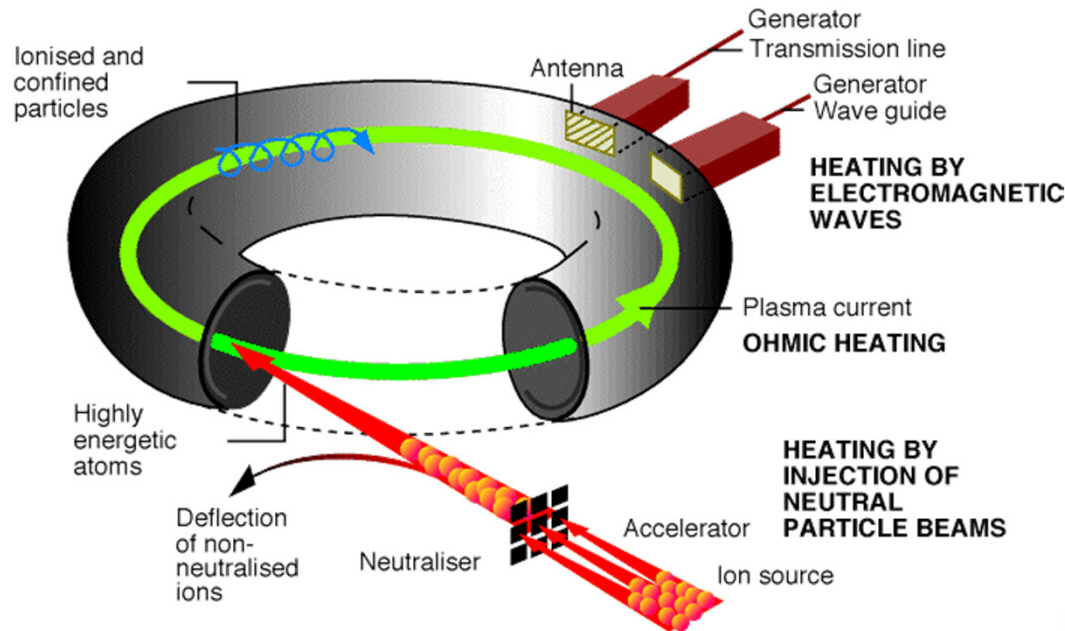
Un particolare subset di PF coils è quello che genera la **configurazione a divertore**

Perturbazioni



Saddle coils per il controllo locale delle instabilità magnetoidrodinamiche

Fusione in laboratorio: riscaldamento



Riscaldamento ohmico:
 elevati correnti (MA) circolanti nel plasma scaldano per effetto Joule



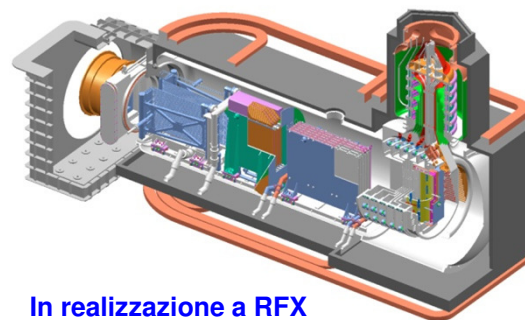
$$P = RI^2$$

$$\eta = 1 \times 10^{-8} \Omega m$$

$$@1keV$$

$$I \sim 10 \text{ MA}$$

Iniezioni di particelle veloci: cessione di energia al plasma per collisioni



In realizzazione a RFX

Onde EM: accoppiamento di potenza tramite radiazioni alla frequenza di risonanza

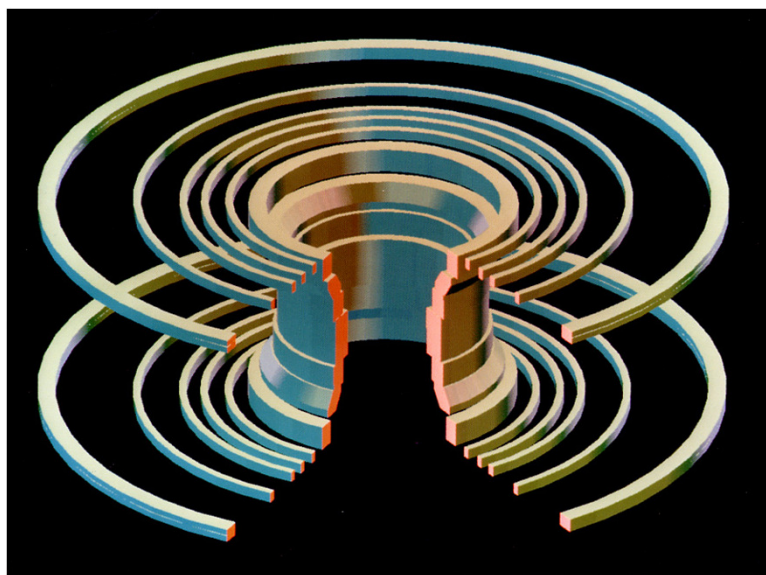


$$\Omega_{i/e} = \frac{qB}{m_{i/e}}$$

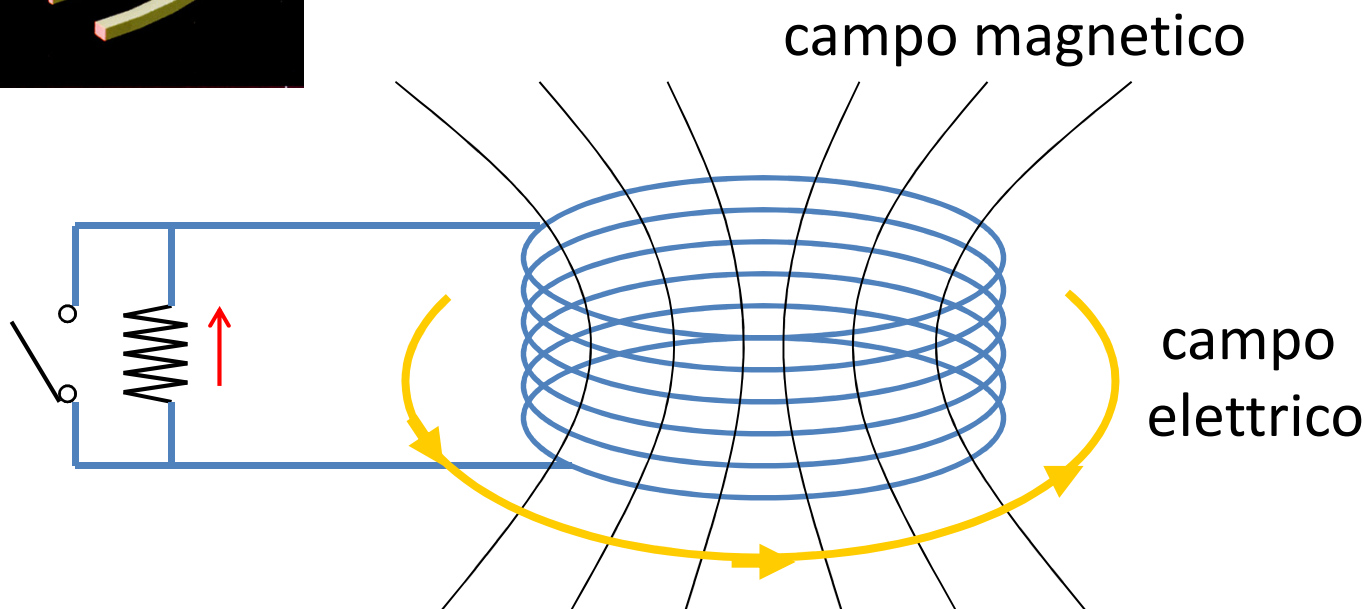
$$D/T: \sim 50 \text{ MHz}$$

$$e: \sim 100 \text{ GHz}$$

Avvolgimento Magnetizzante (CS: Central Solenoid)

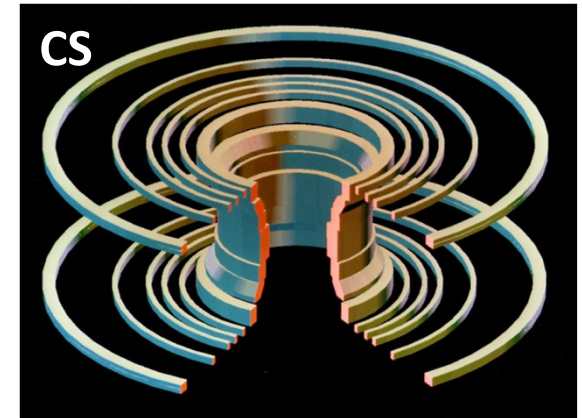
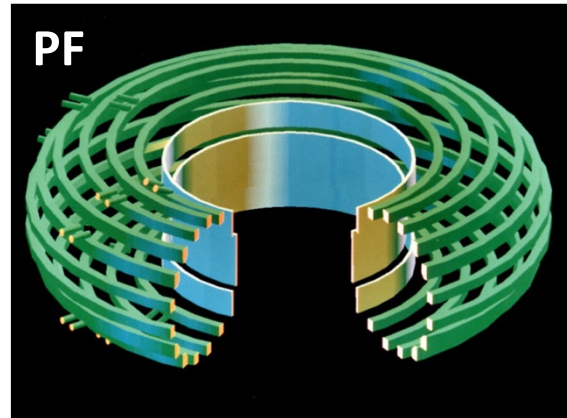
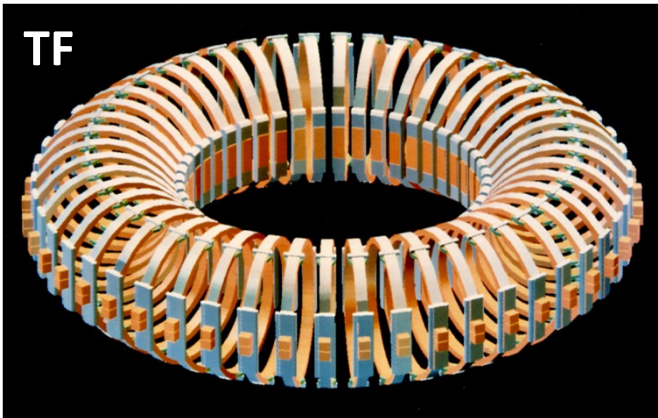


Legge di FARADAY:
Variazione
FLUSSO MAGNETICO
→ f.e.m indotta



SC and magnetic fusion

Global magnetic windings:



High currents (10-100 kA)

Slowly varying currents (1 s)

Long time scales of operations (minutes - hours – steady state)

High magnetic fields required (1-10 T)

GOOD CANDIDATES TO USE SC MATERIALS

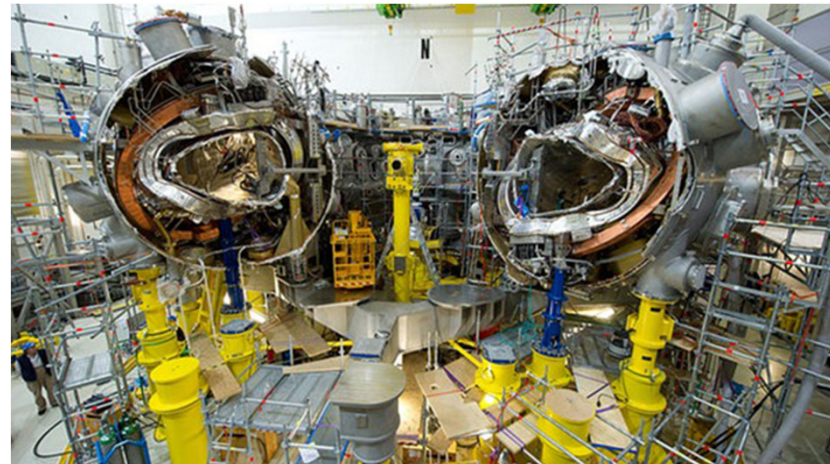
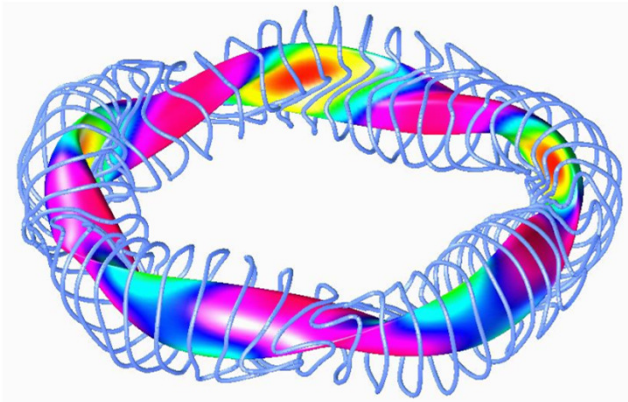
- **Questione energetica:** perché studiare la nuove fonti di energia?
- Come avviene il processo di **fusione tra nuclei**?
- È possibile riprodurlo e sfruttarlo sulla terra?

- Qual è lo stato attuale della **ricerca** fusionistica nel mondo?
- Il prossimo passo: **ITER**
 - Il contributo italiano e padovano

Strategia Europea

7 + 1 missioni per arrivare con **energia elettrica in rete** nella seconda metà del XXI secolo:

1. Studio dei regimi operativi di plasma reattoriale in configurazione **Tokamak**
2. Estrazione della potenza: concetto di **divertore**
3. Materiali in grado di sostenere il **flusso neutronico** a 14.1 MeV
4. Produzione del **Tritio** (in una centrale circa 0.5 kg al giorno)
5. Procedure di **sicurezza** per l'uso di una centrale con reattore a fusione
6. Progetto integrato di **DEMO**: centrale prototipo con produzione di energia elettrica
7. Studio per ridurre il **costo** del kWh e ricerca socio-economica
8. Linea alternativa: lo **stellarator**



Tokamak

Camera di scarica toroidale in cui gli avvolgimenti magnetici generano il campo magnetico di confinamento del plasma che è percorso da elevate correnti

Maggiore è il campo, migliore è il confinamento del plasma:

$$\beta = \frac{p_k}{B^2/2\mu_0} \sim 1 - 3\%$$

Parametri di JET:

$R = 2.96 \text{ m}$

$a = 1 \text{ m}$

$I_p = 4.5 \text{ MA}$

$B_t = 3.5 \text{ T (Cu coils)}$

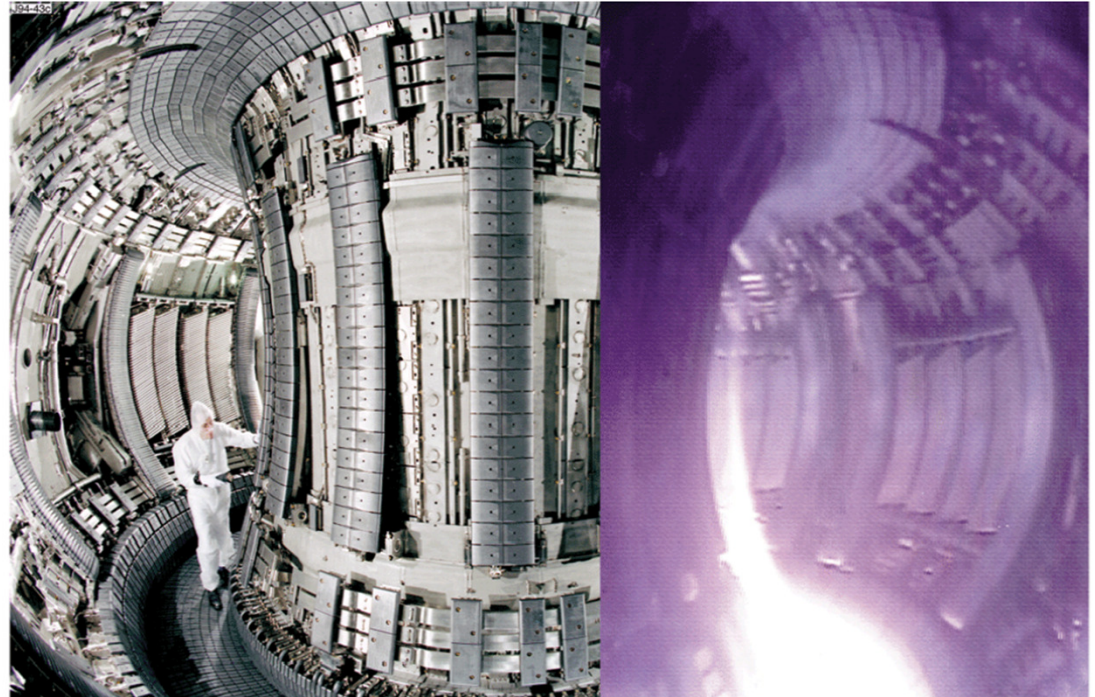
$P_{aux} = 40 \text{ MW}$

$V_{pl} = 100 \text{ m}^3$

$T_e; T_i = 8 \text{ keV}$

$n_e = 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

durata = 10 s



JET 1997: esperimenti DT ottenendo

16 MW di potenza di fusione (0.7 s)

$Q = 0.64, Q_p = 0.94$

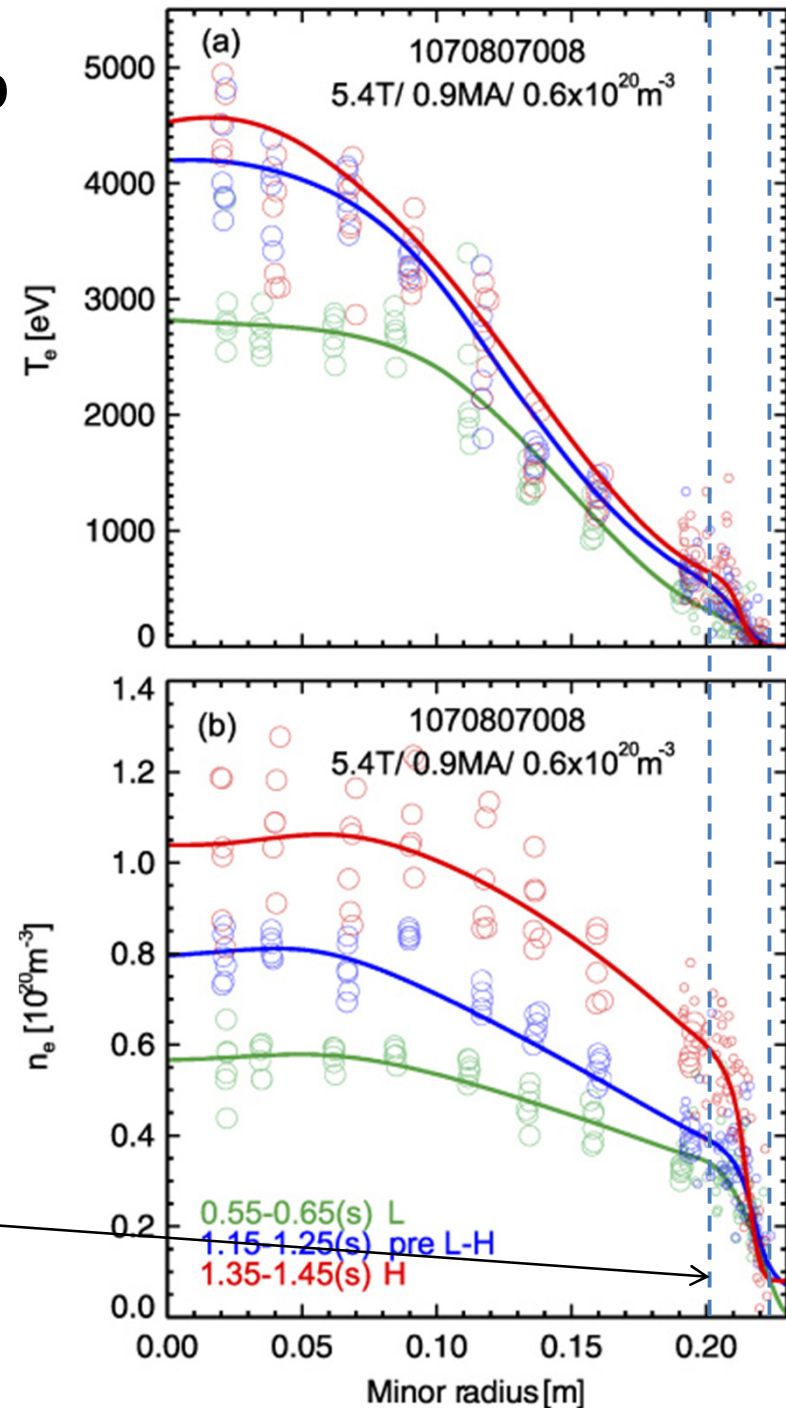
Dimostrando la possibilità di ottenere energia da fusione sulla Terra

Nuovi esperimenti DT saranno condotti nell'autunno-inverno 20-21: obiettivo 25 MW per 5s

Regimi di funzionamento

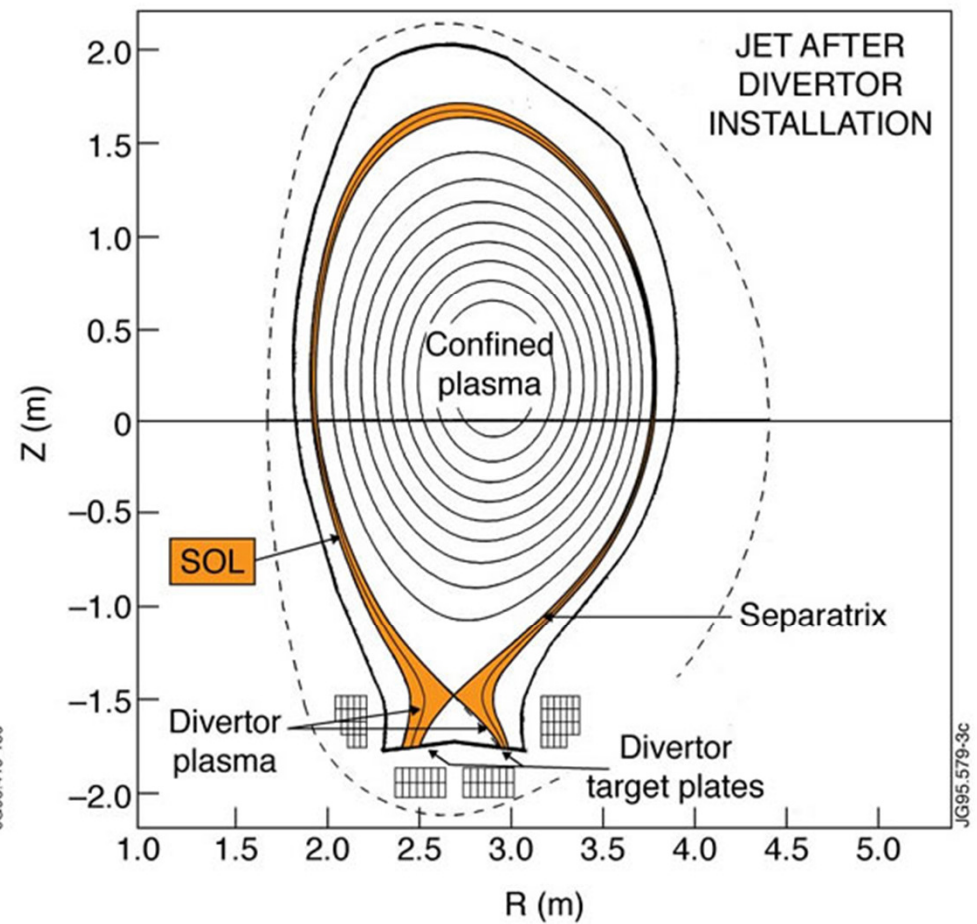
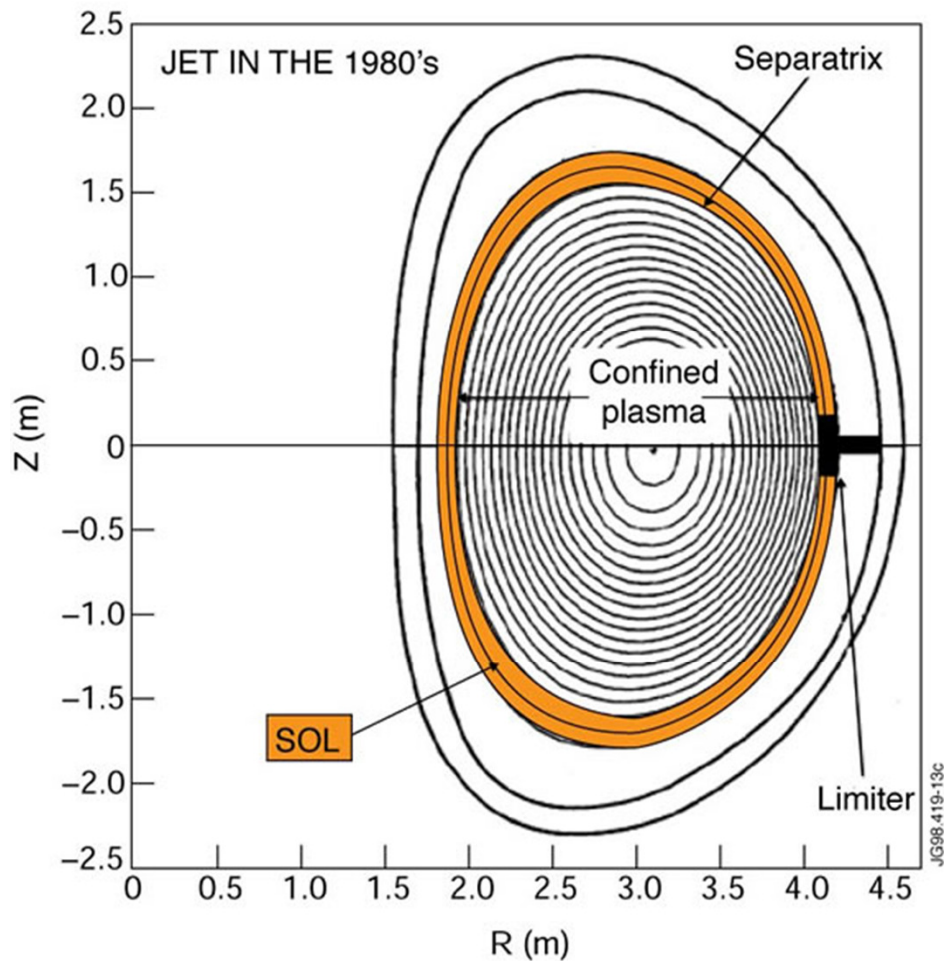
2 regimi principali

- modo L:** plasma con limiter;
 (relativamente) basso confinamento;
 trasporto di particelle ed energia dal
 centro al bordo
- modo H:** plasma con **divertore**,
 elevata potenza ausiliaria, alto
 confinamento ($> \times 2$), trasporto di
 energia e particelle limitato, con la
 conseguente formazione di un
 pedestal

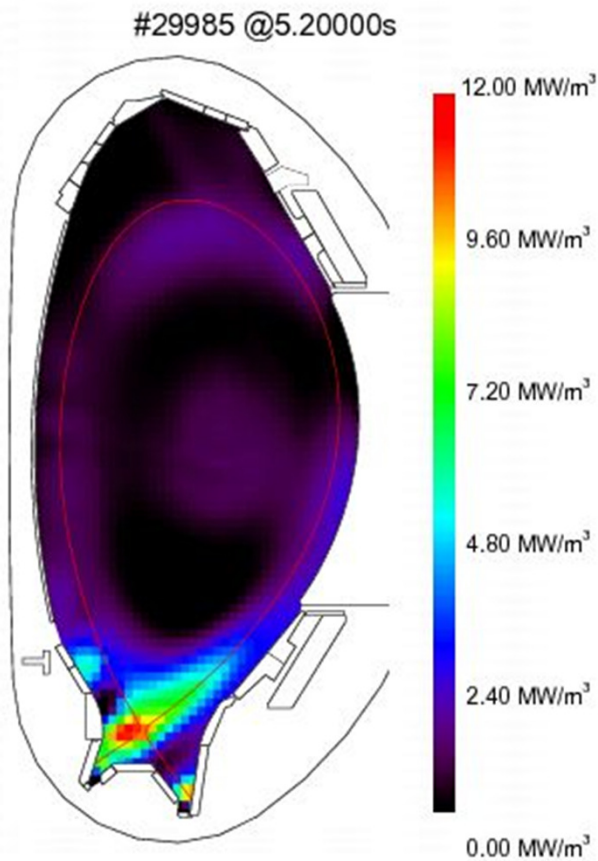
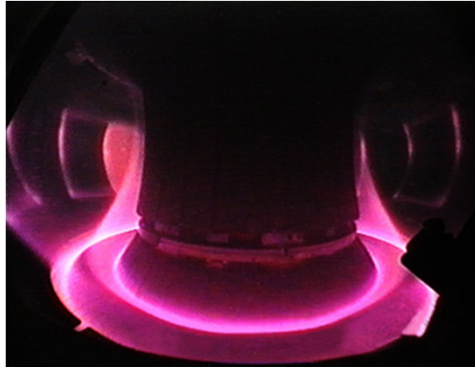


Il divertore

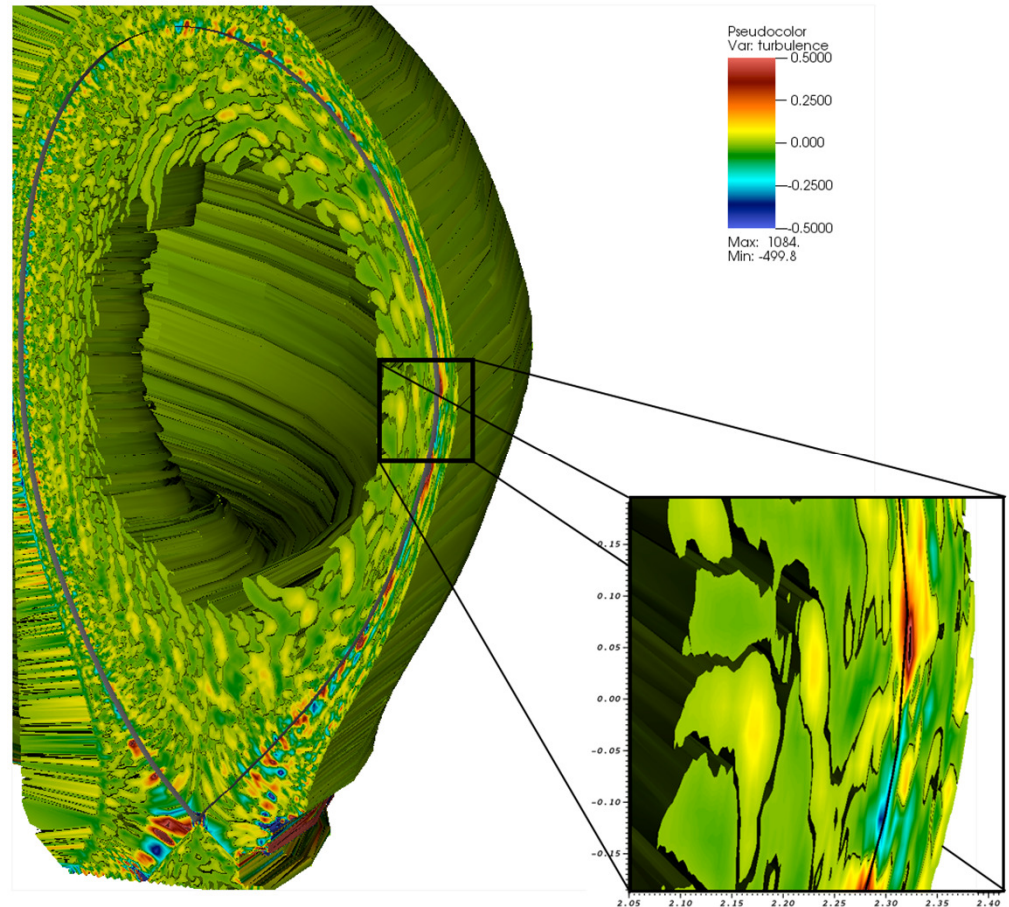
Permette il disaccoppiamento del plasma dalla parete con «frantumazione» delle strutture coerenti che sono alla base del trasporto di energia e particelle: formazione del PEDESTAL



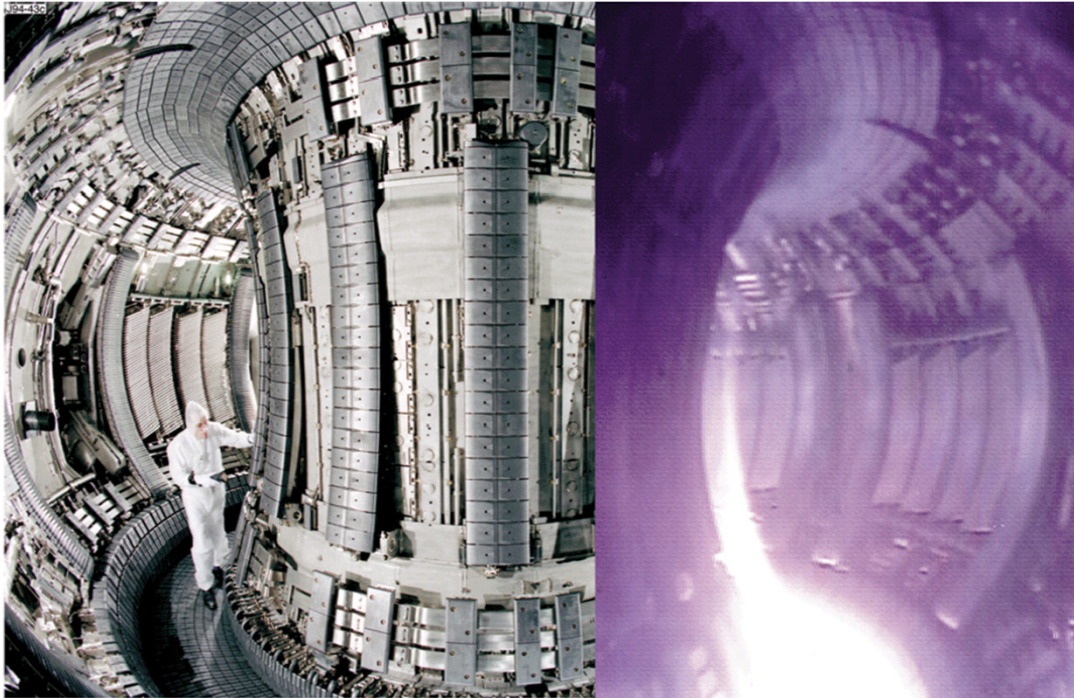
Il divertore



Concentra l'interazione plasma-parete sulle piastre del divertore ($\Gamma > 20 \text{ MW/m}^2$), preservando il resto della parete (antenne, porte per NBI, finestre, bobine, ecc...)



Fusione: approccio multidisciplinare



Fisica:

- Instabilità magnetiche
- Interazione plasma – parete
- Burning plasma

Ingegneria:

- Sistemi di potenza ausiliaria
- Movimentazione remota robotizzata
- Funzionamento continuo

Scienze dei materiali:

- Flussi potenza (10-20 MW/m²)
- Tecnologia dei superconduttori
- Flusso neutronico
- Limitato inquinamento del plasma

Besides JET: far East experience on SC tokamak

KSTAR, based in South Korea
Operating since 2008

Nb₃Sn and NbTi magnets

R/a	1.8/0.5 m
Magnetic field	3.5 T (toroidal)
Heating	14 MW
Plasma current	2 MA



EAST, based in China
Operating since 2006 (world record long pulse
103s - 2017)

Mainly NbTi magnets

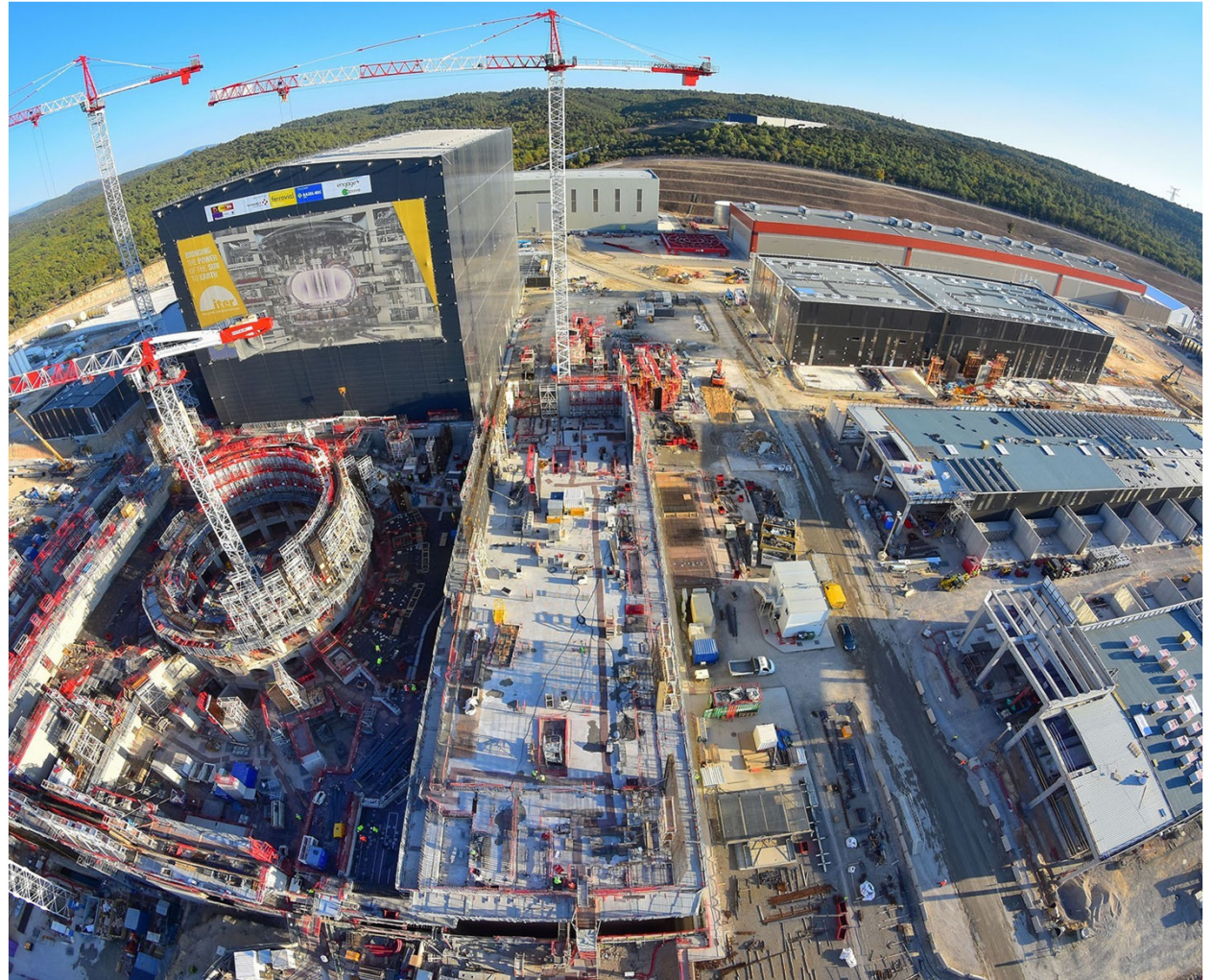
R/a	1.85/0.45 m
Magnetic field	3.5 T (toroidal)
Heating	7.5 MW
Plasma current	1.1 MA



- **Questione energetica:** perché studiare la nuove fonti di energia?
- Come avviene il processo di **fusione tra nuclei**?
- È possibile riprodurlo e sfruttarlo sulla terra?
- Qual è lo stato attuale della **ricerca** fusionistica nel mondo?
- Il prossimo passo: **ITER**
 - Il contributo italiano e padovano

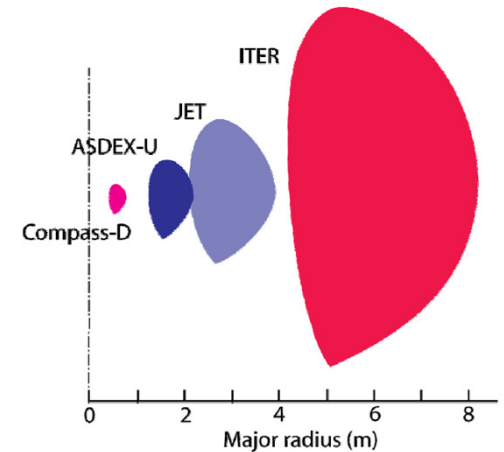
Il futuro: ITER

- ITER rappresenta il passaggio fra gli studi attuali di fisica dei plasmi e la futura centrale di potenza a fusione
- Collaborazione internazionale di 7 partner: **EU, Cina, India, Sud Korea, Giappone, USA e Russia**
- L'accordo sul sito di ITER è stato raggiunto nel **giugno 2005**
- **Ottobre 2007**: il progetto è stato finanziato e si è posata la prima pietra
- In costruzione a Cadarache, nel sud della Francia: primo plasma 2025-2026
- Costo circa 15+10 miliardi €



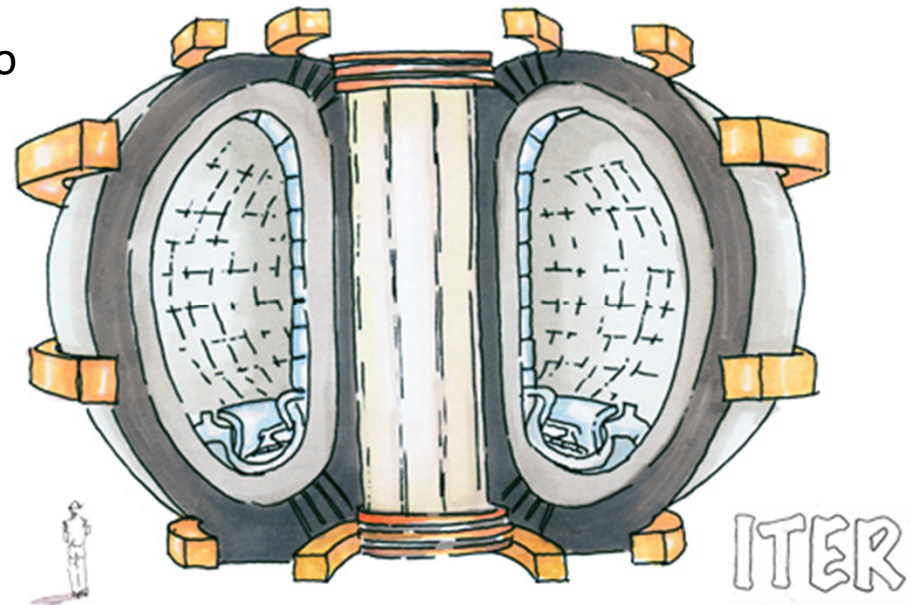
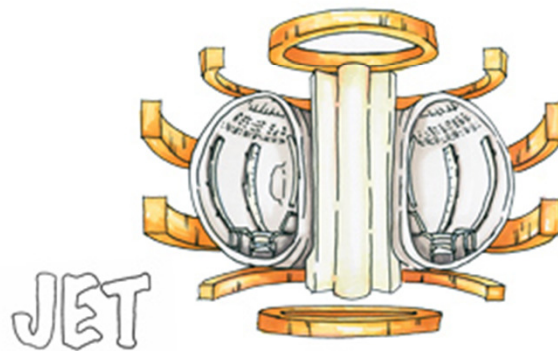
Obiettivi di ITER

- Dimostrare la capacità tecnologica di costruire e gestire un impianto superconduttivo da fusione 10 volte più grande di JET
- Testare gli scenari reattoriali non accessibili agli attuali esperimenti
- Testare materiali di prima parete (W, Be, metalli liquidi)
- Studiare un plasma stazionario con $Q = 5-10$:
 - Estrazione della potenza
 - gestione delle particelle α (instabilità, riscaldamento del plasma, estrazione, ecc.)
- Sviluppare e studiare la tecnologia per gestire il Tritio
- Provare sistemi di confinamento e riscaldamento del plasma (in particolare NBI)



Parametri di ITER:

R/a	6,2/2.0 m
B_T	5,3 T
I_p	15 MA
V_p	840 m ³
P_{aux}	50 MW
T	10 keV
Durata	400 s



Il contributo di Padova

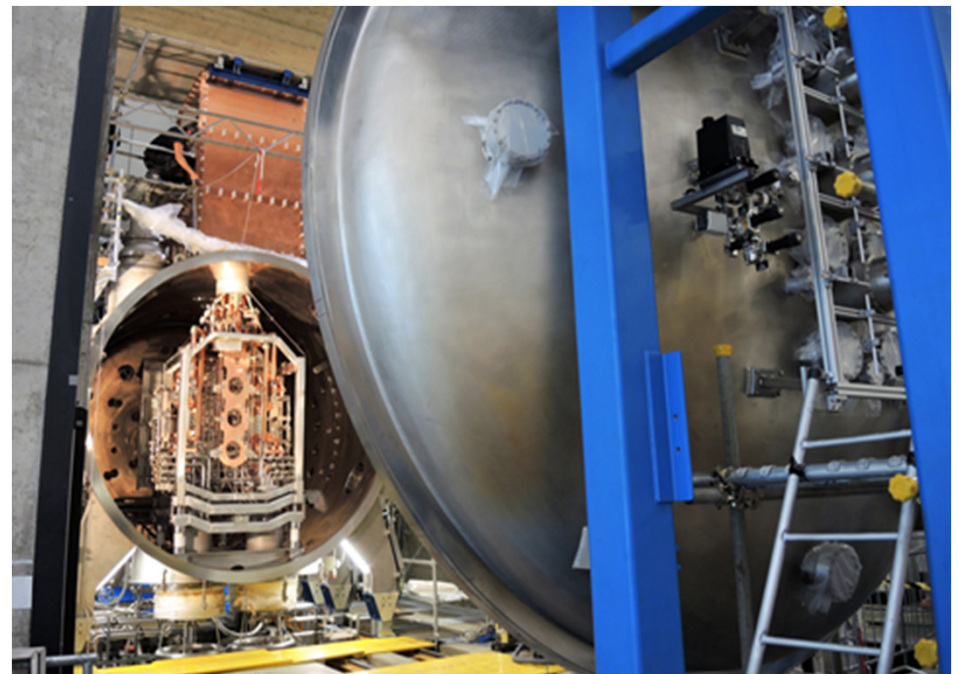
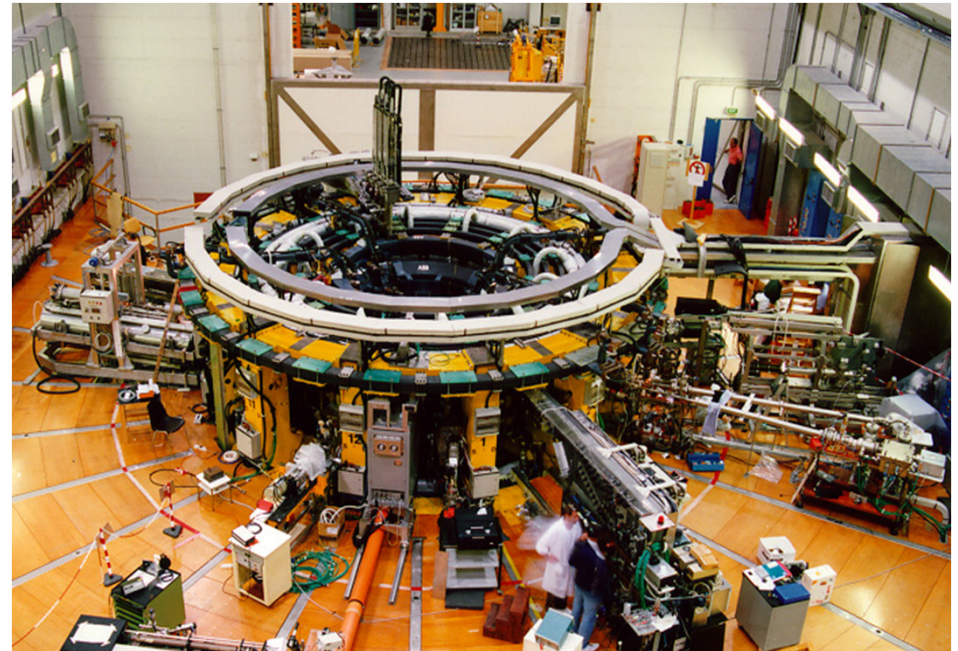
Consorzio RFX

(CNR, ENEA, UniPd, INFN, Acc.Venete)

180 dipendenti

(40 amministrativo,
140 scientifico + 30 studenti)

- Esperimento **RFX-mod** per il controllo del **campo magnetico** in plasmi fusionistici
- **Neutral Beam Test Facility -NBTF-** per progettazione e realizzazione dell'**iniettore di neutri** per ITER
- Ampio coinvolgimento in **EUROfusion - JET**
- Partecipazione al Broader Approach con studi e componenti per **JT-60SA**
- Progettazione di **DTT**



Il contributo italiano DTT

- **Divertor Test Tokamak**
 - $R = 2.10$; $a \sim 0.65$
 - 29 metri cubi di plasma
 - temperatura di 10 keV
 - $I_p = 6.0$ MA
 - $B_t = 6.0$ T
 - carico termico sui materiali $\sim 20-50$ MW/m²
- Il campo magnetico confinante sarà generato da 26 km di **cavi superconduttori** costruiti con **Nb₃Sn** e 16 km con **NbTi**. I superconduttori saranno alla temperatura di 4K, distanti solo poche decine di centimetri dal plasma a 10⁸K
- Servirà per testare il componente «**divertore**» del futuro esperimento DEMO, il prototipo di reattore da fusione che rappresenta l'ultimo passo prima della commercializzazione della energia prodotta da fusione



Broader Approach – JT-60SA

Large Tokamak based in Japan, **50% funded by EU** ($R=3.0\text{m}$, $a\sim 1.2\text{m}$)

$$I_p = 5.5 \text{ MA}$$

$$B_t = 2.3 \text{ T}$$

$$P_{IN} = 41 \text{ MW}$$

$$V_{pl} = 90 \text{ m}^3$$

$$T_e; T_i = 7 \text{ keV}$$

$$n_e = 0.8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

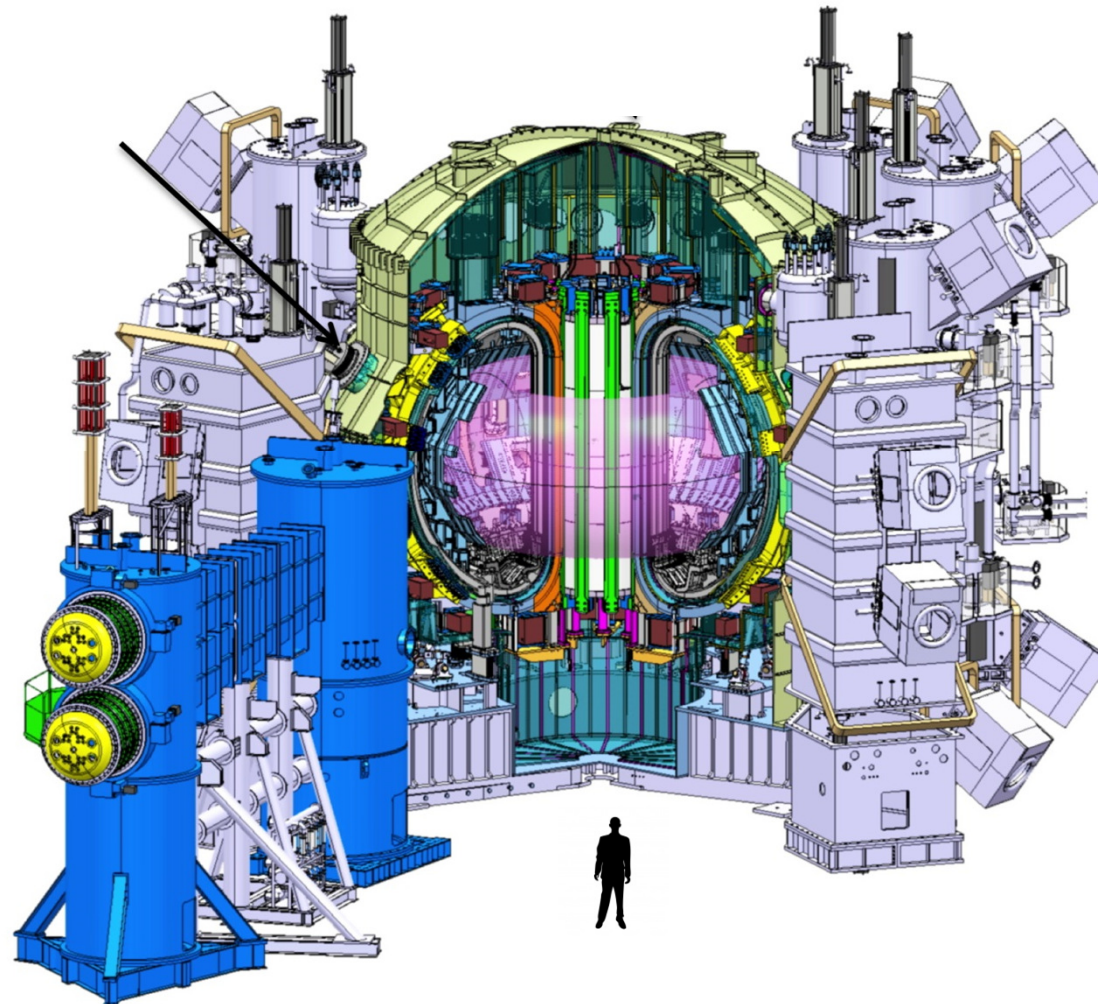
$$\text{Duration} = 100 \text{ s}$$

The superconducting coil system:

- 18 NbTi toroidal field (TF) coils;
- Nb_3Sn central solenoid (CS);
- 6 NbTi equilibrium field coils (PF);

Main goals:

- Explore steady state operation ($\sim 100\text{s}$)
- High plasma pressure, comparable to reactor condition $\beta_N=3.5-5.5$
- Fully non-inductive steady state
- Assemble and operate a large SC plasma device



Start of commissioning: September 2020

Conclusioni

- Il panorama energetico mondiale richiede la scoperta e l'utilizzo di **nuove forme di energia**
- La **fusion nucleare** si pone come una futura fonte energetica di primaria importanza, grazie alle sue doti di **sicurezza, ridotto impatto ambientale** e **larga disponibilità** dei reagenti
- La ricerca europea è leader mondiale nell'ambito della fusione, ospitando il **progetto ITER**
- **L'Italia, con il Consorzio RFX, l'ENEA Frascati, il CNR di Milano e Università e centri di ricerca, è uno degli attori principali della ricerca sulla fusione nucleare**

www.igi.cnr.it – Consorzio RFX

www.iter.org – ITER

www.it60sa.org – JT-60SA

www.iea.org – International Energy Agency

www.iaea.org – International Atomic Energy Agency

www.euro-fusion.org – organizzazione europea per la ricerca fusionistica

Social media: @ConsorzioRFX

