

Le prospettive della fusione italiana ed europea con DTT

G. Vlad

ENEA, Fusion and Nuclear Safety Department , C.R. Frascati, 00044, Italy

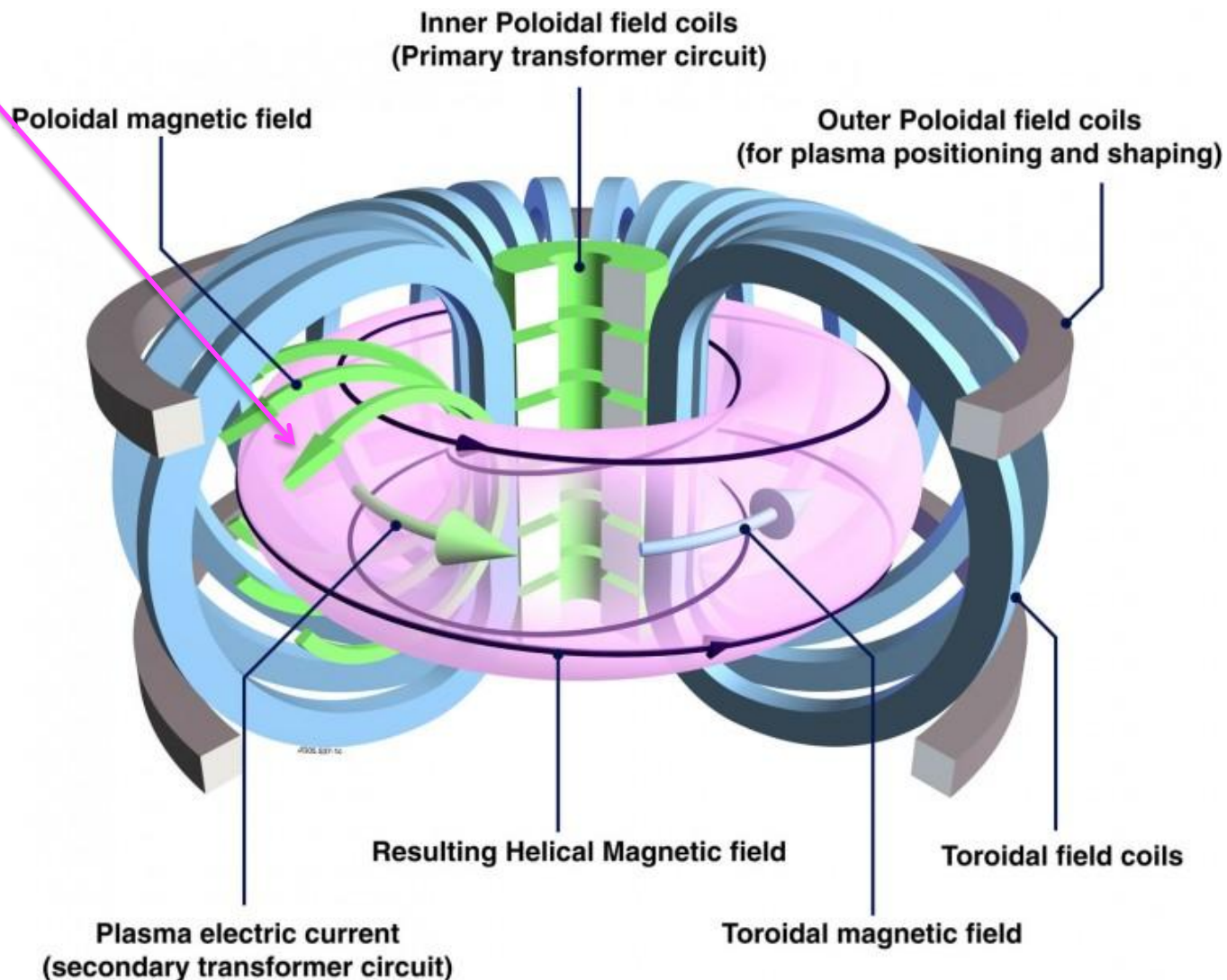
Un po' di storia... (1)

- 1957: Su sollecitazione di E. Amaldi, Bruno Brunelli, Enrico Persico e Franco Rasetti formano un gruppo di ricercatori nell'ambito del CNRN (Consiglio Nazionale di Ricerche Nucleari, poi CNEN, oggi ENEA) che si occupa di fisica del plasma e di fusione termonucleare, presso l'università di Roma.
- 1960: l'attività si trasferisce a Frascati, viene firmata l'Associazione CNRN-EURATOM sulla fusione.
- 1968: I risultati assai promettenti del Tokamak russo T3 (1968) convincono il gruppo di Frascati a orientarsi sul progetto e costruzione di una macchina della linea Tokamak.
- ~1970: Contatti con l'MIT (prof. Bruno Coppi) dove si stava realizzando il **Tokamak Alcator** (Coppi, ricordando Bruno Rossi, riferisce sempre che l'idea originale di Alcator era di studiare l'emissione di raggi X da plasmi di tipo astrofisico).

- 1971-1978: Si progettò (1971) e completò la costruzione (1978) del **Tokamak FT**, di dimensioni compatte ($a/R=0.23\text{m}/0.83\text{m}$), alto campo toroidale ($B=10\text{T}$), quindi plasmi ad alta densità di particelle ($n\approx 10^{14}\text{cm}^{-3}$, alta densità di corrente e quindi alto riscaldamento ohmico. Record di $n\tau_E=4\times 10^{13}\text{ s cm}^{-3}$, con $T_e\approx 1\text{keV}$. Riscaldamento ausiliario con onde di LH (2.45 GHz).
- 1983-1989: Progetto (1983) e costruzione del FT Upgrade, **FTU** (1989) ($a/R=0.30\text{m}/0.93\text{m}$, $B=8\text{T}$, $I_p=1.6\text{MA}$, studio riscaldamento ausiliario LH e EC, ...).
- Nel frattempo, in Europa, viene progettato (1978) e costruito (1983) **JET** (Joint European Torus, Culham, vicino Oxford, UK), primo passo verso un reattore a fusione, oltre che una macchina di ricerca scientifica: possibilità di utilizzo di miscele D-T (esperimenti D-T:1997, anche su **TFTR**, Princeton, USA), quindi produzione di particelle alpha da fusione, etc. Frascati partecipa al progetto e alla gestione: **JET** è tutt'ora in funzione.

Disegno concettuale di Tokamak

Colonna di plasma



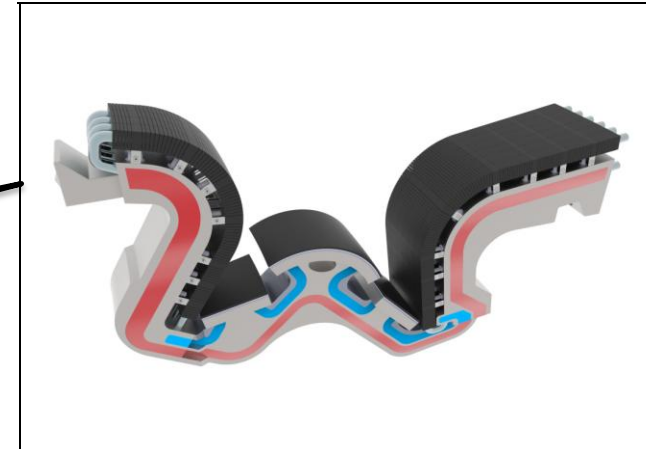
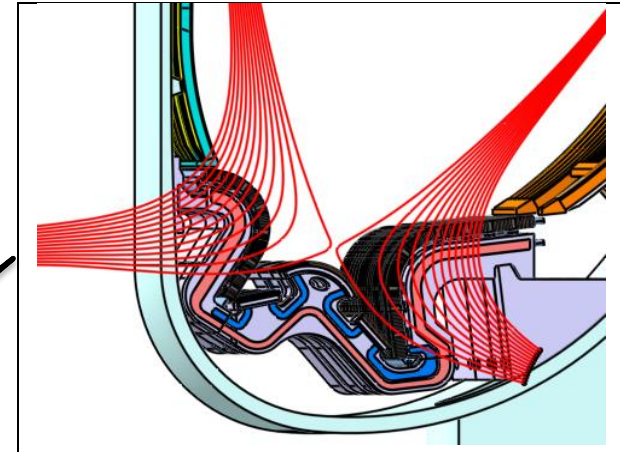
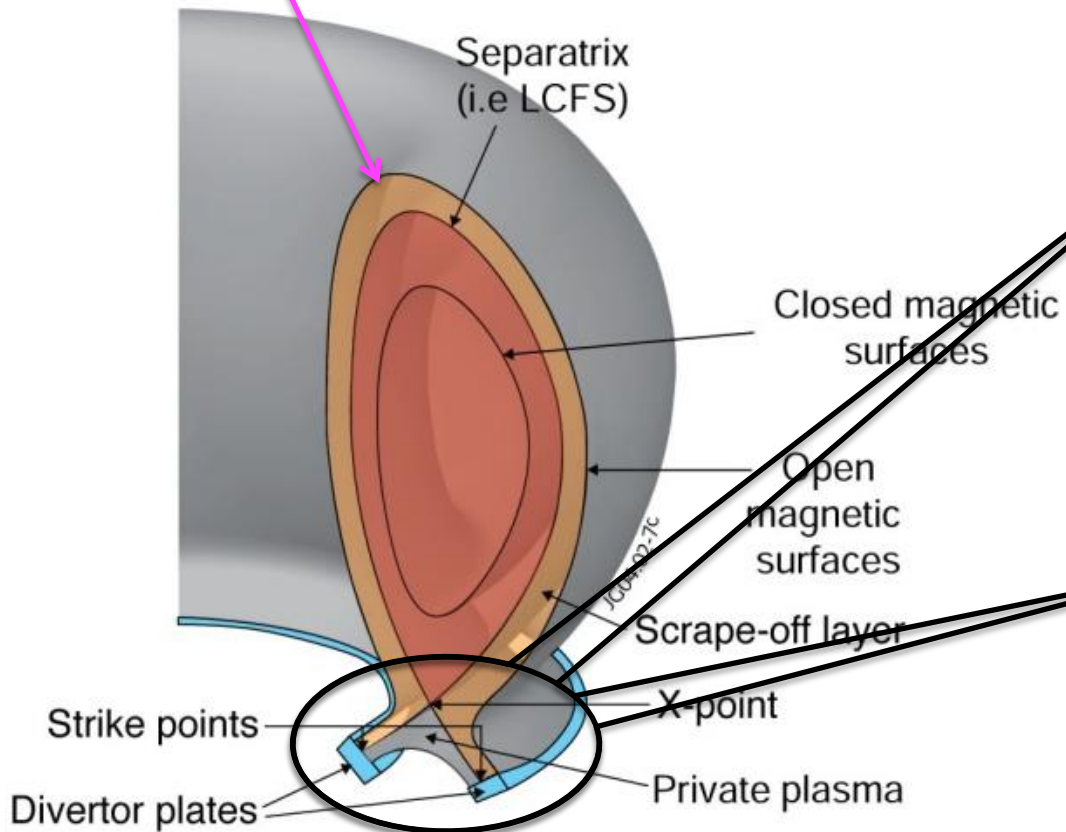
- 2006: firma dei partner internazionali (**China, the European Union, India, Japan, Korea, Russia and the United States**), nel 2006, dell'accordo su **ITER**, il “Next Step” per dimostrare la fattibilità della fusione termonucleare nel produrre energia; la costruzione inizia nel **2010** in Europa (Cadarache, France), il primo plasma è previsto nel Dec. **2025(?)**. Obiettivo: **$Q=10$** (Q , il “fusion power gain”, è il rapporto tra potenza di fusione e potenza di riscaldamento: **500MW da fusione/50MW potenza di riscaldamento**). Sezione a D, **$a/R=2\text{m}/6.2\text{m}$** , **$B=5.3\text{T}$** , **$I_p=15\text{MA}$**
- 2007: Il Broader Approach, accordo tra Europa e Giappone, prevede la costruzione del Tokamak ***JT60-SA***, la “International Fusion Material Irradiation Facility”, **IFMIF**, e , l’”International Fusion Energy Research Centre”, **IFERC**, cioè un centro per il progetto di DEMO, un centro di supercalcolo e un centro per operare da remoto ITER, tutte facilities in Giappone.
- 2050: **DEMO** (reattore dimostrativo di una centrale nucleare a fusione).

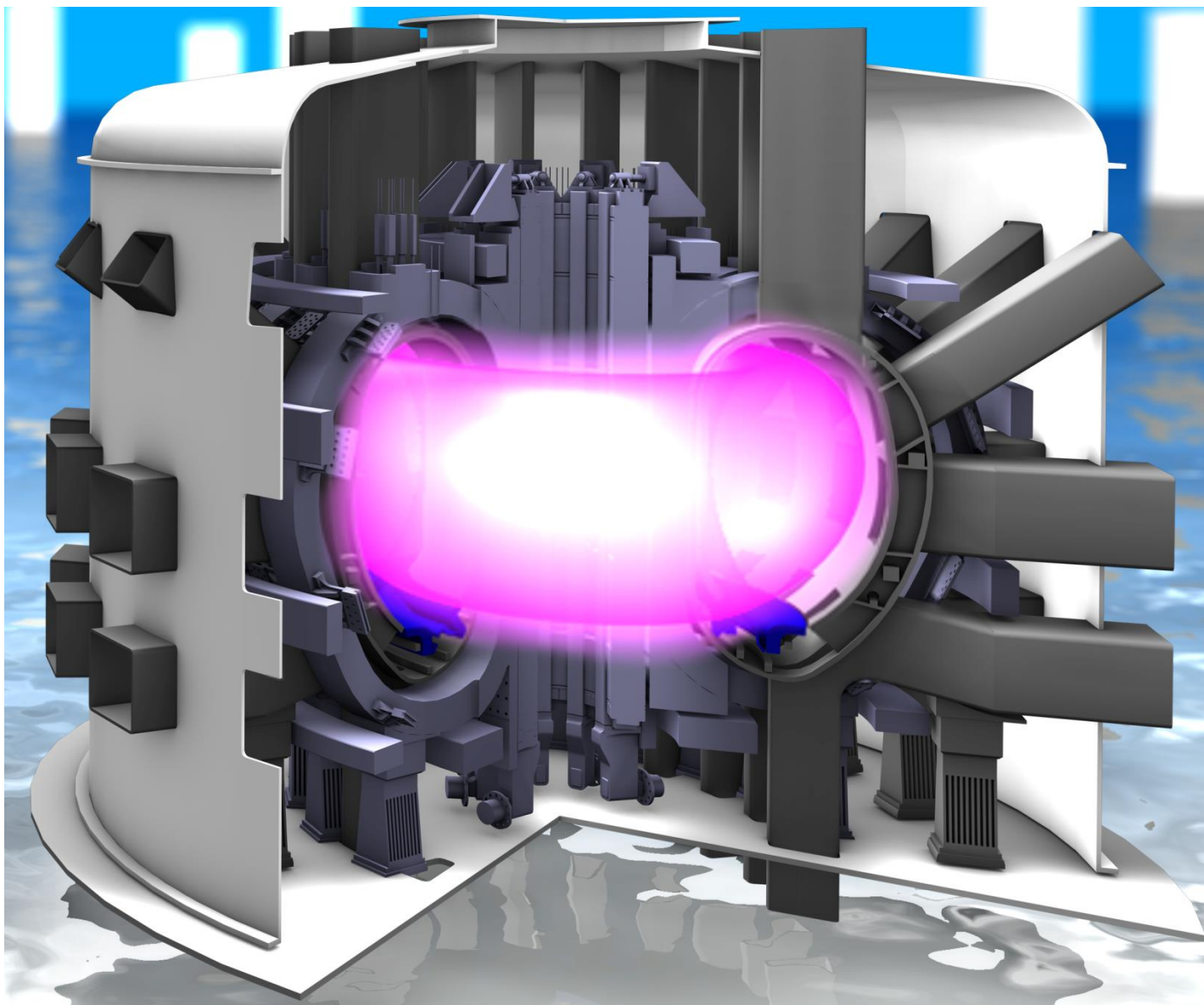
- 2015: nuova proposta di Tokamak **DTT** (Divertor Tokamak Test facility): evoluzione della proposta **FAST** (Fusion Advanced Studies Torus, 2010) proposta per lo studio della fisica delle particelle energetiche (plasmi senza Trizio, quindi prodotte da sistemi di potenza ausiliaria), delle operazioni di plasma, delle interazioni plasma-parete in maniera “integrata”. Sezione a D, $a/R=0.7\text{m}/2.15\text{m}$, $B=6\text{T}$, $I_p=6\text{MA}$
- DTT studierà in maniera dettagliata la fisica del divertore, per studiare le problematiche relative allo smaltimento dei carichi termici in ITER e DEMO, con l’ambizione di fornire soluzioni integrate* degli aspetti fisici e tecnologici.
- La figura di merito dei carichi termici sulla parete esterna essendo il rapporto tra la potenza proveniente dal plasma confinato e il raggio maggiore del toro, $P_{\text{sep}}/R \approx 15\text{-}20 \text{ MW/m}$

* integrate nel senso di voler studiare il problema dei carichi termici sul divertore, con carichi termici, a loro volta, prodotti da un plasma confinato con caratteristiche il quanto più possibile simili a quelle di ITER e DEMO.

Configurazione con Divertore

Colonna di plasma





La proposta DTT (1)

- DTT è stato progettato scalando in maniera opportuna i parametri fisici caratteristici di un plasma da ignizione (riferimento: ITER) (il plasma è ignito quando il calore generato dalle reazioni di fusione autosostiene il plasma alla temperatura necessaria a produrre le reazioni stesse):
- $\rho^* \equiv \rho/a$ (raggio di Larmor ionico/raggio minore del toro);
- $\beta \equiv \langle p \rangle / (B^2/2\mu_0)$ (rapporto tra pressione di plasma e pressione magnetica);
- ν^* (rapporto tra lunghezza di connessione e cammino libero medio delle particelle intrappolate)
- T (temperatura di plasma, per tenere in conto anche la dipendenza degli effetti di fisica atomica al boro del plasma)
- I parametri “adimensionali” possono essere variati modificando (a parità di equilibrio, geometria, profili spaziali di densità e temperatura del plasma):
 - B (campo magnetico),
 - R (raggio maggiore),
 - n (densità di plasma),
 - T (temperatura di plasma).

La proposta DTT (2)

- Non è possibile scalare contemporaneamente tutti i parametri adimensionali (l'unica macchina che può rappresentare il plasma di ITER è ITER stessa...), quindi è necessario “rilassare” la condizione di similarità:
- La scelta eseguita per DTT è stata di assumere costante tra ITER e DTT il parametro $\rho * R^\epsilon$, ($\epsilon \approx 0.75$) riducendo le dimensioni della macchina in maniera tale da mantenere il costo all'interno dei vincoli di finanziamento imposti (si può dimostrare che tale scelta permette di investigare una fisica di interesse per ITER).
- La costruzione di DTT richiederà circa **7/8 anni**; opererà per circa **20 anni**; avrà bisogno di circa **150 professionals** per le operazioni; l'intenzione dei proponenti è che il programma di ricerca sia fortemente integrato con in programma europeo (EUROfusion).

La proposta DTT (3)

		DEMO	ITER	DTT	JET	AUGD	MAST-U	TCV	WEST
Major radius	R (m)	8.77	6.20	2.15	2.98	1.65	0.8	0.88	2.50
Minor radius	a (m)	2.83	2.00	0.70	0.95	0.50	0.60	0.24	0.5
Toroidal field	B_t (T)	5.80	5.30	6.0	3.20	2.40	0.84	1.45	3.7
Plasma current	I_p (MA)	20.3	15.0	6.0	3.50	1.50	2.00	0.45	1
Elongation	k	~1,6	~1.8	~1.8	1.7	1.6	<2.5	<2.2	1.4
Aspect ratio	$A = \varepsilon^{-1}$	3.1	3.1	3.1	3.1	3.3	1.3	3.7	5
Average atomic mass	$\bar{A}$	2.5	2.5	2	2	2	2	2	2
Heating power	P_{heat} (MW)	450	120	45	35	27	7.5	2.5	16
Effective heating power	P_{eff} (MW)	300	100	45	35	27	7.5	2.5	16
Power across LCFS	P_{sep} (MW)	150÷200	87	36 [¶]	28 [¶]	21.6 [¶]	6.0 [¶]	2.0 [¶]	12.8
	P_{sep}/R (MW/m)	17.1÷23	14	16.7	9.4	13.1	7.5	2.3	5
Average temperature	$\langle T \rangle$ (keV)	12.5	8.5	6.2	3.4	2.5	3	0.9	2
Average electron density	$\langle n_e \rangle$ (10^{20}m^{-3})	0.9	1.0	1.7	0.9	0.9	1.0	0.8	0.8
Normalised ion gyroradius	ρ_* (10^{-3})	1.6	2.0	3.8	4.0	8.5	22	17	5.0

Alcune caratteristiche di DTT:

- Magneti superconduttori;
- Plasma con sezione poloidale a “D” con divertore;
- Possibilità di studiare configurazioni magnetiche “avanzate” e diverse configurazioni di divertori, inclusi quelli basati su metalli liquidi, per ottimizzare lo smaltimento del calore sulle piastre del divertore stesso
- Riscaldamento addizionale, inizialmente
 - 20 MW Ion Cyclotron Resonance Heating, ICRH;
 - 20 MW Electron Cyclotron Resonance Heating, ECRH;
 - in seguito Neutral Beam Injection, NBI.
- Mantenere un forte presidio nazionale sulla fisica della fusione termonucleare, addestrare giovani ricercatori italiani ed esteri.

La proposta DTT (5)

- DTT ha l'ambizione di voler studiare il problema integrato dello smaltimento del calore nel divertore;
- questo permetterà, di conseguenza, di affrontare sostanzialmente tutte le tematiche di fisica del plasma tipiche dei regimi di plasmi igniti, p. es.:
 - equilibrio e stabilità MHD,
 - accoppiamento onde-plasma per efficienza di riscaldamento,
 - il trasporto di energia e particelle, diversi regimi di turbolenza, accoppiamento di scale spaziali e temporali multiple,
 - studio di popolazioni sovratermiche (ioni, elettroni accelerati da ICRH, ECRH, NBI) e loro interazione con onde di Alfvén per simulare l'effetto di particelle alpha da fusione in plasmi igniti, trasporto associato,
 - etc.
- È auspicabile un forte coinvolgimento con la comunità scientifica italiana...

Finanziamento DTT (500 M€):

- mutuo europeo di 250 M€ erogato dalla Banca Europea degli Investimenti (fondi Juncker);
- finanziamenti nazionali di varia natura (MIUR, MISE, Regione ospitante il sito, etc. 160 M€);
- contributi da Eurofusion (60 M€ dal 2023, condizionati alla possibilità di alloggiare in DTT il tipo di divertore scelto...);
- contributi dalla Repubblica Popolare Cinese (circa 30 M€ in componenti), in qualità di partner scientifico del progetto