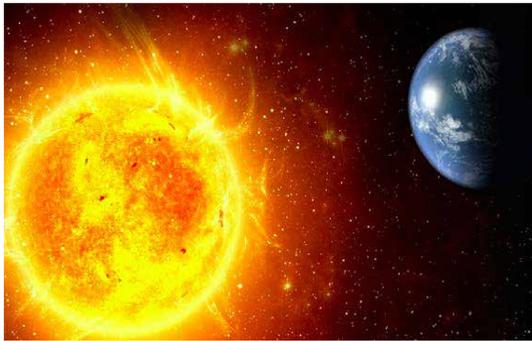
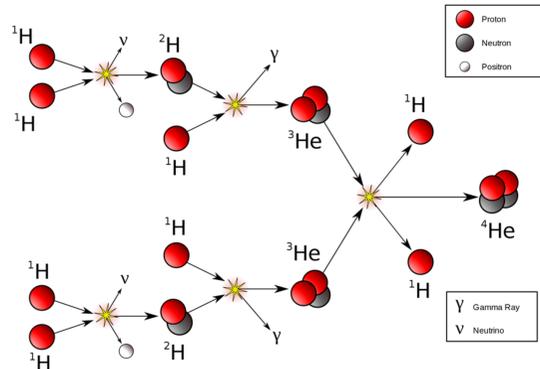


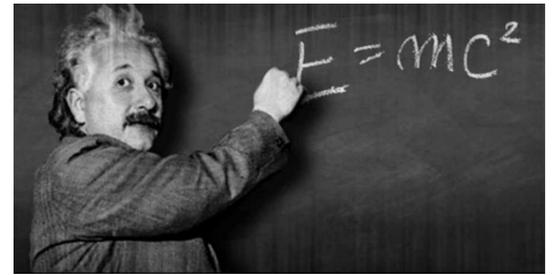
- La materia intorno a noi è organizzata in strutture infinitesimali: **ATOMI**
- La parte centrale (**Nucleo**) è formata da **Protoni** (carica positiva) e Neutroni (privi di carica elettrica)
- Il nucleo è circondato da **Elettroni** (carica negativa) in numero uguale ai protoni, per cui l'atomo è elettricamente neutro
- Dalle reazioni nucleari si può ricavare energia in due modi: **FISSIONE** o **FUSIONE**



Il processo di fusione avviene all'interno del Sole e di tutte le Stelle



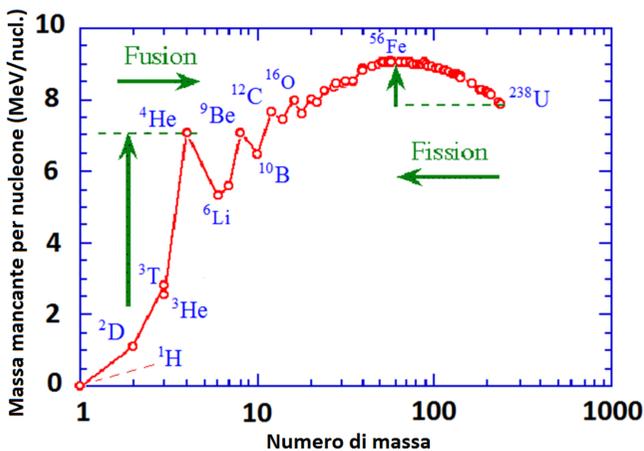
Reazione di fusione dominante nel Sole (protone-protone)



Equivalenza massa-energia

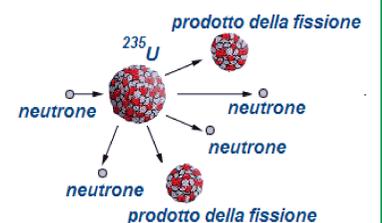
La **fusione** è una **reazione nucleare** in cui due nuclei di elementi leggeri (idrogeno), grazie alle **forze nucleari forti**, si fondono a temperature e pressioni elevate per dare origine a un nucleo più pesante (elio), la cui massa è però minore della somma delle masse dei nuclei di partenza. Si ha così un **difetto di massa** (Δm) corrispondente a un rilascio di energia ($E = \Delta m \cdot c^2$), che si manifesta sotto forma di energia delle particelle generate dal processo di fusione (particelle cariche, fotoni, etc.). Il difetto di massa può essere visto anche come un aumento dell'**energia di legame** (= massa mancante per nucleone).

ENERGIA DI LEGAME

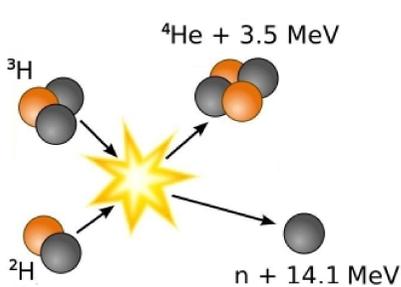


L'energia di legame rappresenta l'energia che bisogna fornire per disintegrare un nucleo, ossia per portare allo stato libero i suoi componenti. Nella figura a fianco è rappresentata l'energia di legame per nucleone in funzione del numero di **nucleoni**. Per avere rilascio di energia i prodotti della reazione devono avere energia di legame superiore a quelli di partenza. Ci sono così due possibilità di ottenere energia: **fusione** di nuclei leggeri o **fissione** di nuclei pesanti.

FISSIONE



La fusione è la reazione opposta alla **fissione**. Inoltre, fondendo nuclei leggeri si ottiene più energia per nucleone di quella che si ottiene in un processo di fissione.

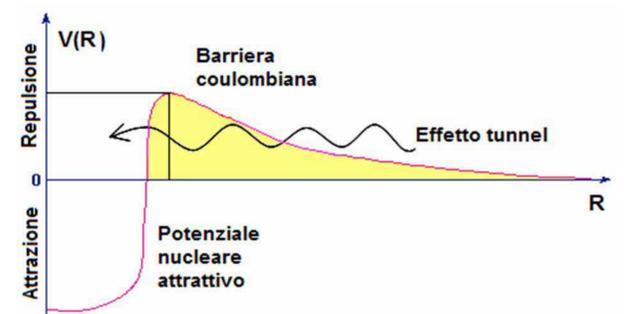


La reazione che avviene nel Sole, che coinvolge anche le **forze nucleari deboli**, è caratterizzata da un tasso di reazione estremamente basso, compensato però dall'enorme disponibilità di protoni all'interno del Sole. Non possiamo riprodurre tali condizioni in laboratorio, ma possiamo realizzare la fusione fra due **isotopi** dell'idrogeno: il **Deuterio** (^2H) e il **Trizio** (^3H). Questa reazione produce **neutroni veloci** (n) e **nuclei di Elio** (^4He). Il Trizio non esiste in natura perché radioattivo con breve vita media; verrebbe prodotto dal reattore stesso a partire dal **Litio** (Li). Quindi i combustibili primari sono ^2H e Li, facilmente reperibili e sufficienti per milioni di anni (ai consumi attuali).

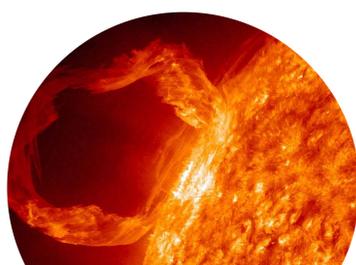
Con **33 mg** di Deuterio ricavati da un litro di acqua di mare e con 50 mg di Trizio, che si può ottenere da **5 g** di Litio (estratto dalla crosta terrestre), si produce una energia equivalente alla combustione di **360 litri di benzina**.

Per ottenere la fusione di due nuclei è necessario avvicinarli a una distanza per la quale le **forze nucleari forti** prevalgano sulla **repulsione coulombiana** (10^{-13} cm). A tal fine è necessaria una temperatura molto elevata (cento milioni di gradi) alla quale la materia è **ionizzata**, cioè un miscuglio di nuclei "nudi" e di elettroni "liberi", il **plasma**. Esso è in realtà molto comune in natura.

Eccone di seguito alcuni esempi:



nebulose



corona solare

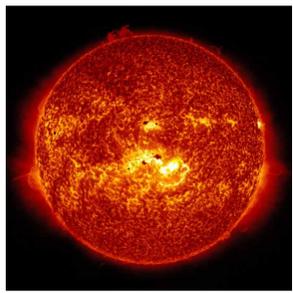


ionosfera terrestre



fulmini

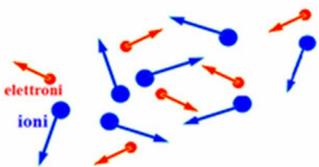
Per riprodurre il processo di fusione in laboratorio sono essenziali due cose: mantenere confinato il plasma in una regione di spazio limitata e scaldare il plasma per raggiungere le temperature necessarie



15 milioni di °C

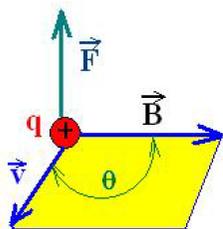
Nel sole la forza di **GRAVITÀ** confina le particelle.
In laboratorio invece si possono utilizzare i **CAMPI MAGNETICI**

Plasma libero



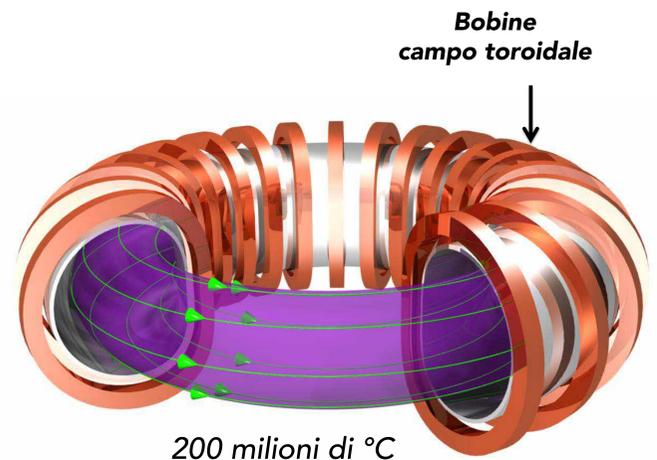
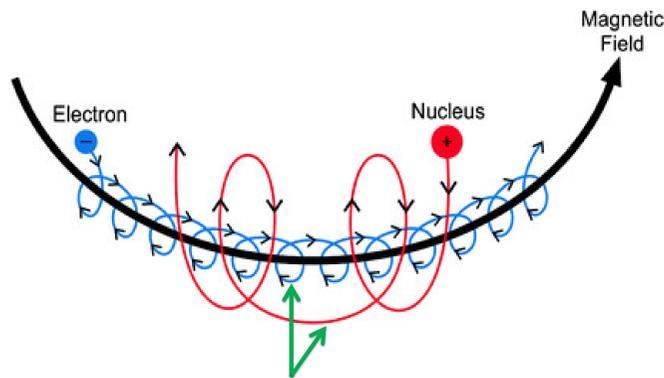
$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Forza di Lorentz



$$\rho = \frac{m v_{\perp}}{qB}$$

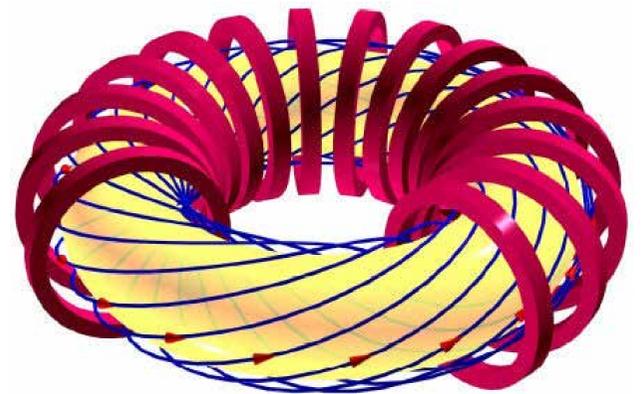
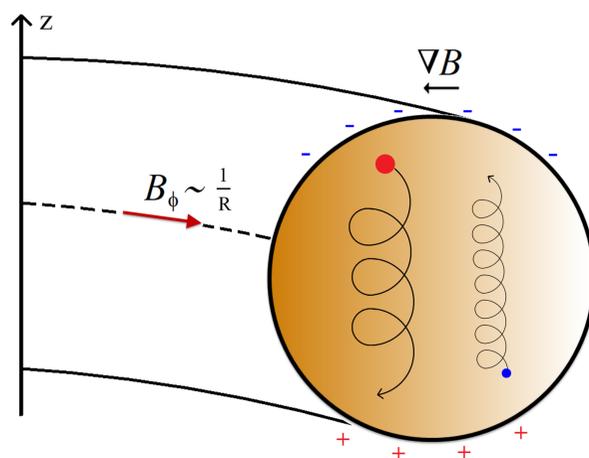
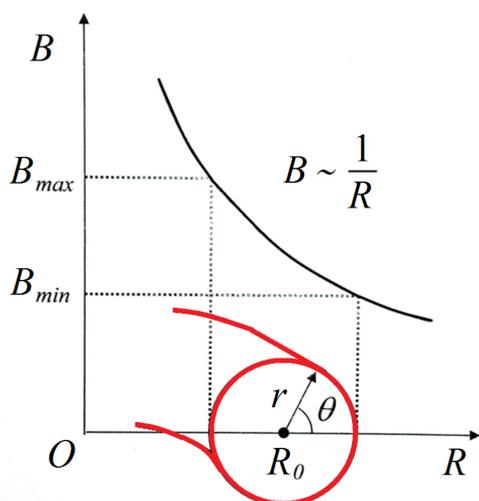
Raggio di Larmor



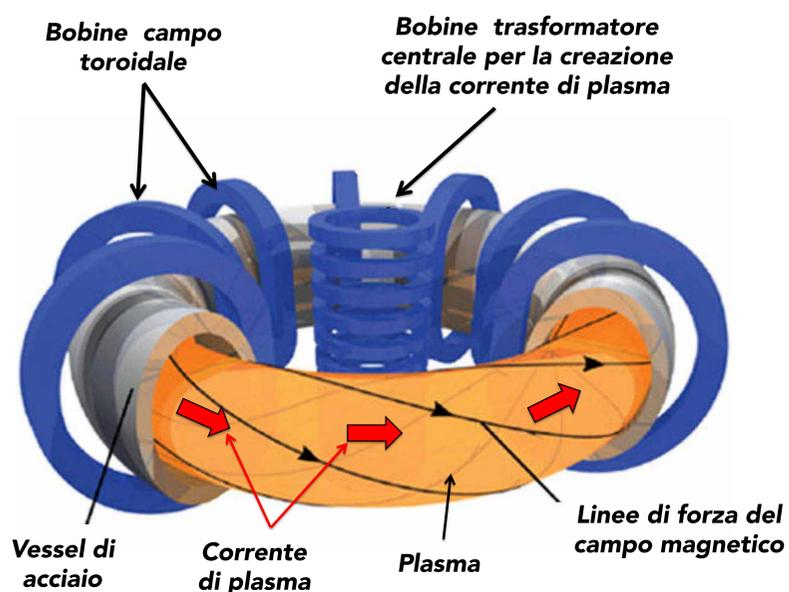
200 milioni di °C

Grazie alla forza di Lorentz le **particelle cariche** sono vincolate a percorrere un moto a elica intorno alle linee di forza del campo magnetico.

Il campo magnetico si ottiene grazie a bobine conduttrici. Per chiudere le linee di campo su loro stesse si dispongono le bobine a ciambella formando un **campo toroidale**, che risulta però non più omogeneo. Ciò produce un effetto di **deriva** delle particelle cariche verso le pareti. Essa si può compensare avvolgendo **elicoidalmente** le linee di forza.



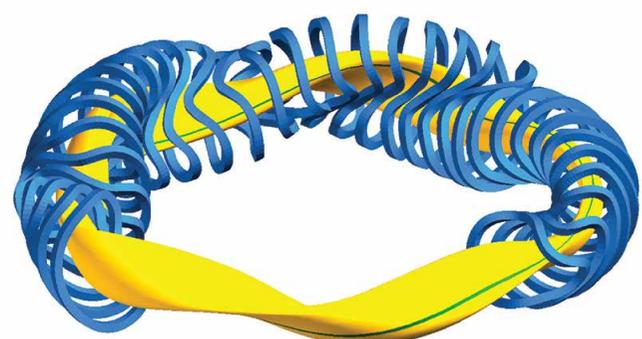
Nel caso del **TOKAMAK**, che è la linea di ricerca attualmente più sviluppata, la struttura elicoidale del campo magnetico si ottiene facilmente grazie alla **corrente di plasma** che aggiunge una componente di campo magnetico poloidale. La corrente di plasma, che contribuisce anche a scaldare il plasma per effetto Joule, viene indotta da un **trasformatore centrale**: di conseguenza il Tokamak è una macchina **impulsata**.



Bobine principali di un Tokamak

UN ALTRO APPROCCIO BASATO SUL CONFINAMENTO MAGNETICO

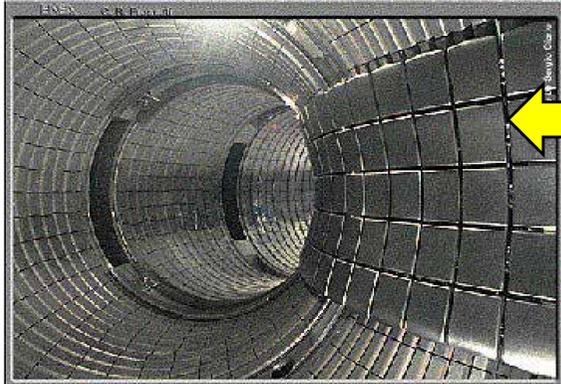
Negli ultimi anni, si stanno facendo notevoli progressi anche sulla linea dello **Stellarator** in cui il campo elicoidale è ottenuto sagomando opportunamente le bobine. Molto più complesso, lo Stellarator è intrinsecamente più stabile e non ha bisogno di corrente di plasma (no trasformatore centrale), potendo perciò operare indefinitamente.



Bobine principali dello Stellarator W7-X

LIMITER

Nonostante il confinamento magnetico, esiste comunque un inevitabile **flusso di energia** verso l'esterno sotto forma di radiazione e particelle. In un reattore tipico tale flusso raggiungerebbe valori intollerabili per i materiali di cui è fatto il vessel (max 5÷10 MW/m²). Per evitare che esso si danneggi, si possono usare degli elementi sacrificali (**limiter**), costruiti con materiali particolari. Il limiter, intercettando le linee di forza del campo magnetico, è investito dalla maggior parte delle particelle che sfuggono al confinamento.



Su FTU sono presenti due tipi di limiter fatti di **Molibdeno**

- **limiter toroidale** (che è fisso attorno al trasformatore)
- **limiter poloidale** (che può essere estratto e inserito)

Inoltre si sta sperimentando un nuovo tipo di limiter basato su tecnologia a metallo liquido (Litio)

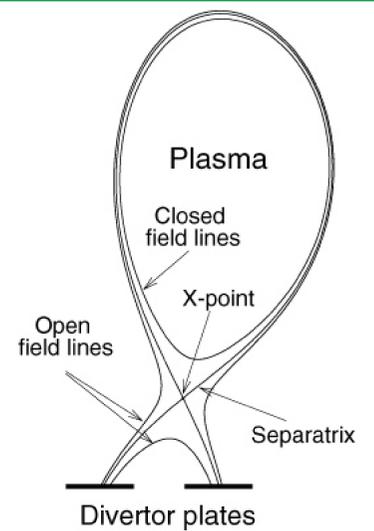
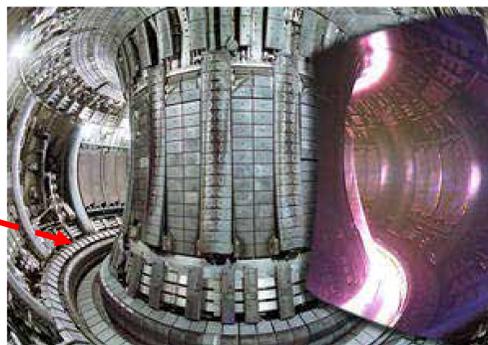


DIVERTORE

Il **divertore** usa invece una particolare **configurazione di campo magnetico** per definire i confini del plasma e guidare le particelle che sfuggono verso particolari zone progettate per assorbire una notevole potenza termica.



Elementi del divertore del JET

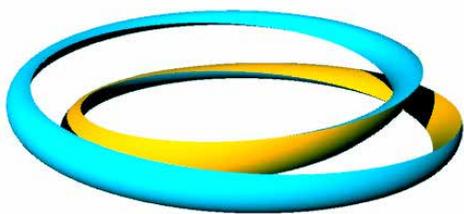


INSTABILITA'

Un Tokamak è sempre afflitto da vari tipi di instabilità che ne perturbano l'ideale configurazione. Ci sono per esempio le instabilità **magneto-idrodinamiche (MHD)**, alcune delle quali producono **isole magnetiche** in grado di crescere fino a distruggere del tutto il confinamento magnetico. In tal caso si ha una **disruzione** con un improvviso e notevole rilascio di energia sulle pareti della camera che possono risultarne danneggiate.

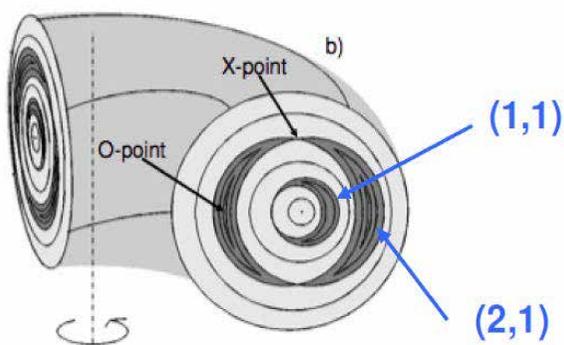
Un attivo campo di ricerca è lo studio di tecniche per impedire queste disruzioni o limitarne gli effetti dannosi (e.g. stabilizzazione delle isole magnetiche mediante onde a radiofrequenza).

APPROFONDIMENTO: ISOLE MAGNETICHE



Struttura di un modo (2,1)

Sezione poloidale del plasma



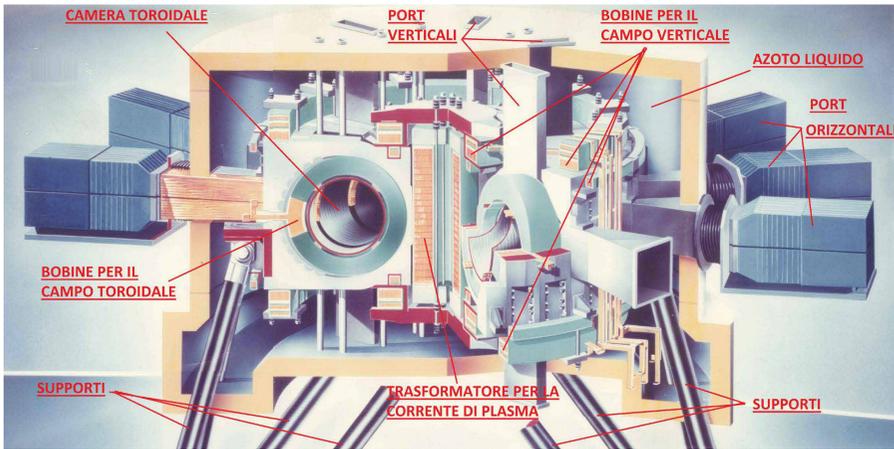
Il modo in cui le linee di forza si avvolgono lungo il toro è descritto da un parametro denominato **fattore di sicurezza**.

$$q = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\theta}$$

φ è l'angolo toroidale e θ quello poloidale e q rappresenta il numero di giri toroidali che una linea di forza percorre per ogni giro poloidale ($\Delta\theta = 2\pi$).

Quando q è numero razionale pari a m/n con m e n interi, la linea si richiuderà su se stessa creando una **risonanza** che produce e amplifica una complessa struttura a nastro che in sezione poloidale appare come m isole magnetiche.

Le isole magnetiche ruotano con una certa frequenza e sono visibili grazie a vari tipi di diagnostiche. Peggiorano il confinamento (a volte fino alla disruzione) e le più pericolose per la stabilità sono quelle con piccoli valori razionali di q (e.g. $q = 2$).

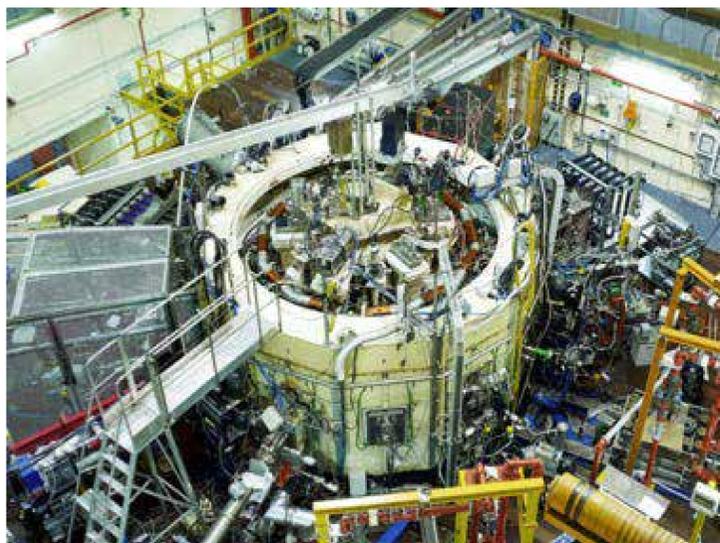
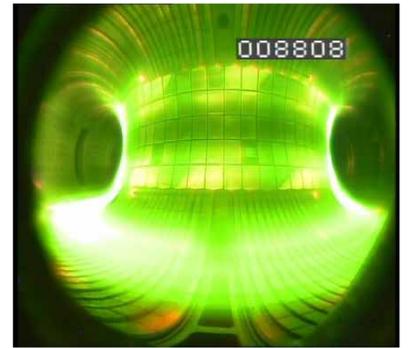


Modellino dell'attuale FTU, 1989

Parametri caratteristici di FTU

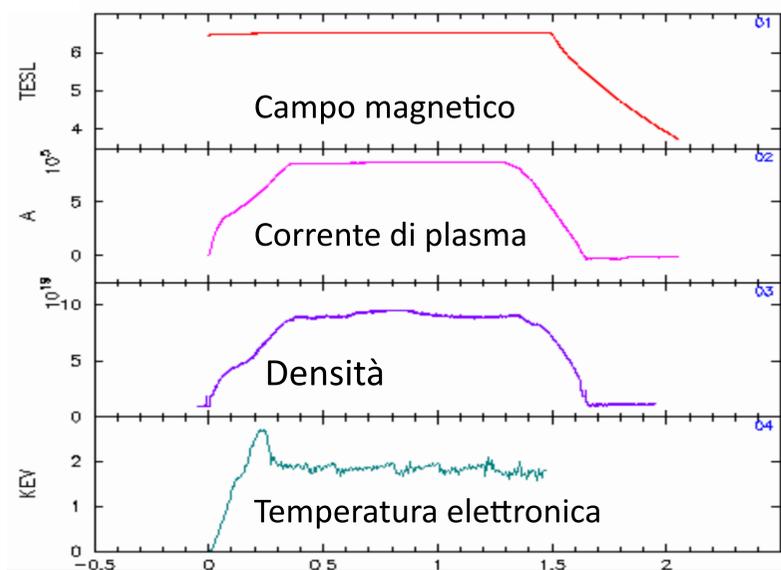
Raggio Maggiore (m)	0,935
Raggio Minore (m)	0,3
Corrente di Plasma (MA)	1.6
Campo Magnetico toroidale (T)	8
Numero di bobine toroidali	24
Numero di ports	12

Plasma dentro FTU

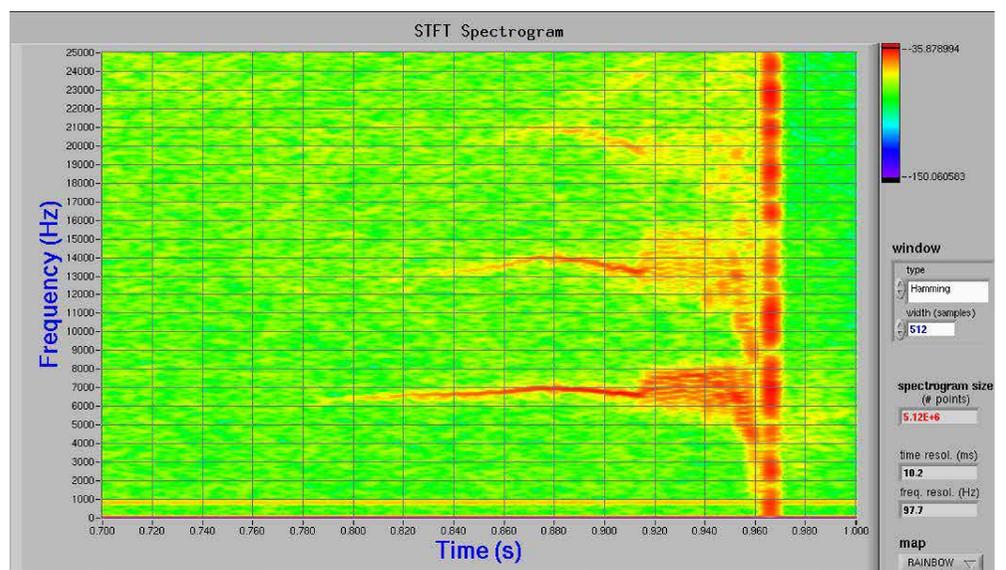


FTU, pur essendo una macchina compatta, si inserisce a pieno titolo nel filone di ricerca relativo ai Tokamak, iniziato nei lontani anni '50. Esso infatti è progettato in modo da produrre un campo magnetico toroidale molto più elevato di altre macchine dello stesso tipo, il che permette di effettuare studi specifici sulla fisica del plasma in regimi di alta densità di particelle e alta densità di corrente che altrove non sono possibili.

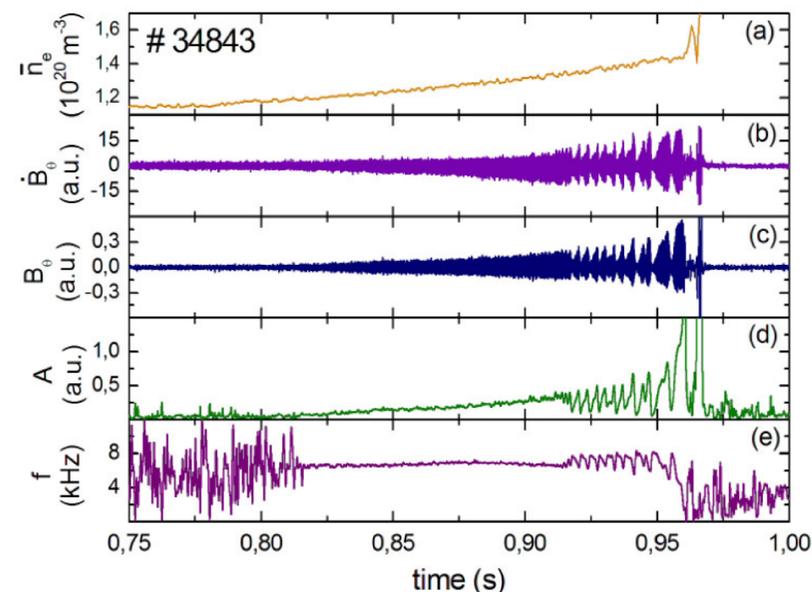
Per generare l'elevato campo magnetico FTU non utilizza bobine superconduttrici ma normali bobine di rame. La loro resistività elettrica viene abbassata mediante azoto liquido a circa -190 °C.



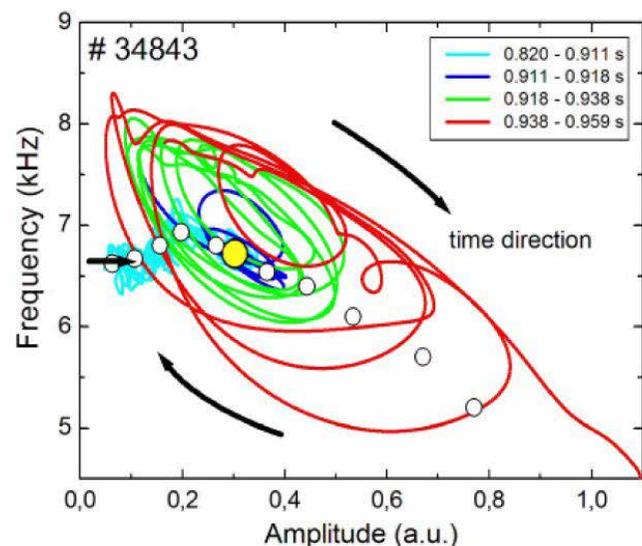
Una tipica scarica di FTU con le più rilevanti grandezze fisiche misurate



spettrogramma dell'attività MHD e disruzione finale



Scarica di FTU con oscillazioni MHD che crescono in ampiezza, evolvono in un'attività ciclica (vedi fig. accanto) e inducono infine una disruzione



Particolare fenomeno scoperto su FTU in cui ampiezza e frequenza delle oscillazioni MHD manifestano un comportamento ciclico nella fase finale