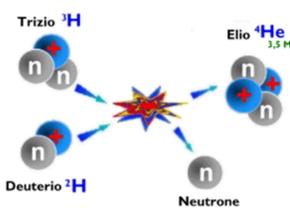


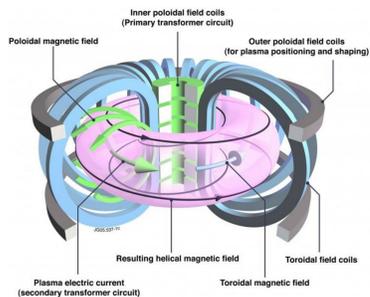
La fusione nucleare a confinamento magnetico



- Il reattore a fusione sfrutta le reazioni di fusione nucleare in cui due nuclei leggeri vengono portati a reagire insieme creandone uno più pesante e liberando al tempo stesso energia, sotto forma di radiazione ed energia cinetica delle particelle prodotte.
- Affinché ciò avvenga è necessario che i due nuclei si avvicinino fino a toccarsi ma, essendo entrambi carichi positivamente, ciò è possibile solo ad altissime temperature, in modo che l'agitazione termica vinca la barriera di potenziale coulombiano (entrambi i nuclei sono positivi) e permetta ai nuclei di unirsi.

• La temperatura necessaria a permettere questo tipo di reazioni nucleari è dell'ordine delle centinaia di milioni di gradi (ovvero decine di keV) e varia con il tipo di reazione: la più accessibile, che sarà utilizzata nei prossimi reattori a fusione, è quella tra deuterio e trizio.

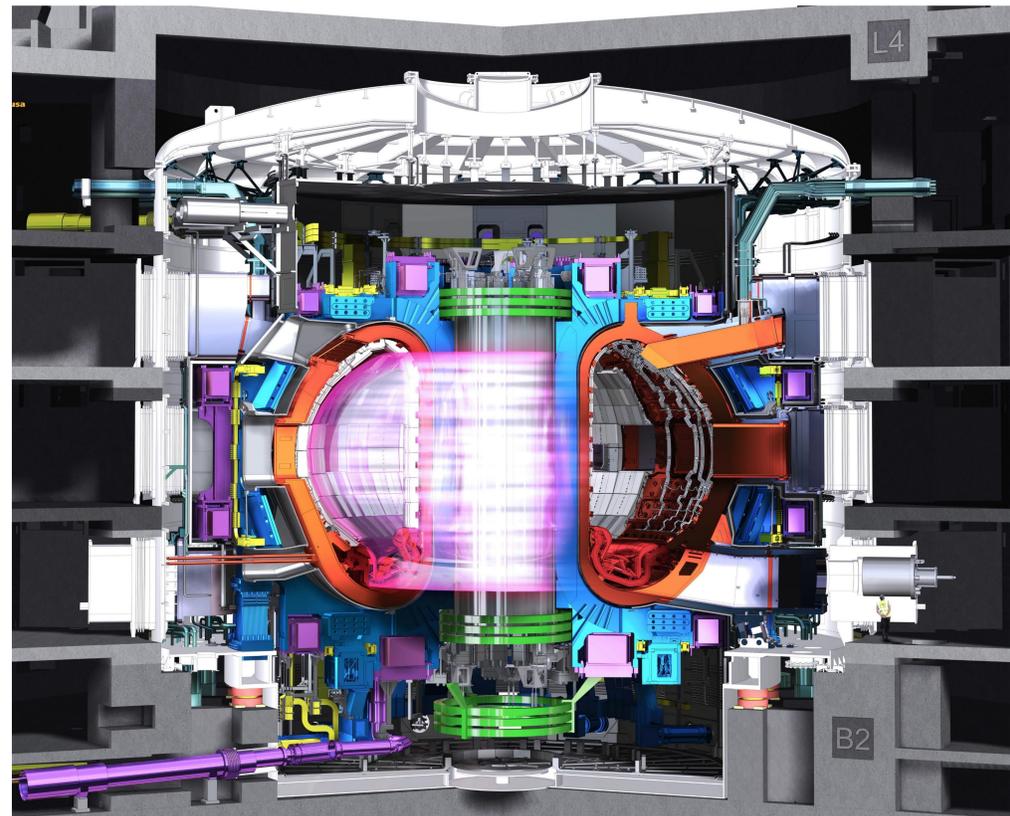
• A queste temperature qualsiasi materiale si trova nello stato di plasma, ovvero un gas di particelle cariche in cui tutti i nuclei e gli elettroni sono liberi tra loro. Nessun materiale è in grado di resistere a queste temperature, si può però sfruttare la carica elettrica dei componenti del plasma per confinarlo magneticamente, ossia per tenerlo lontano, grazie ad elevati campi magnetici, dalle strutture della macchina che lo contiene. La soluzione più usata per confinare il plasma ed allo stesso tempo riscaldarlo è basata sul concetto di macchina tokamak, composta da una camera toroidale (ossia a forma di ciambella) circondata da bobine percorse da corrente.



• Nella camera viene immesso il gas che si ionizzerà formando il plasma. Le bobine sono divise in due gruppi: quelle di campo toroidale, costituite da anelli attorno alla camera, che confinano il plasma e quelle di campo poloidale, costituite da anelli coassiali alla camera, che ionizzano, riscaldano e danno la forma desiderata al plasma.

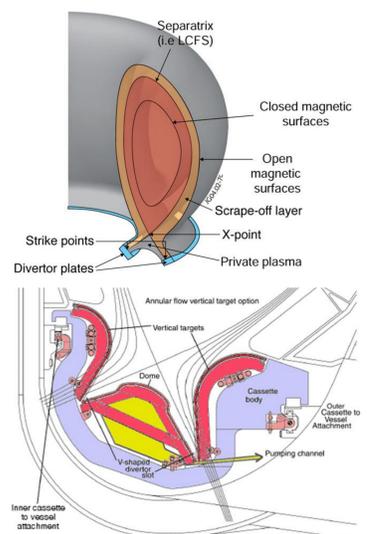
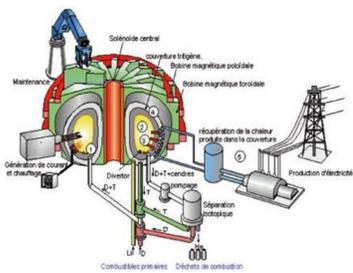
• ITER è la più grande macchina al mondo per lo studio della fusione nucleare a confinamento magnetico, in costruzione in Provenza a Cadarache. Partecipano alla costruzione i governi, progettisti ed imprese di Europa, Russia, USA, Giappone, Corea del sud, Cina ed India. Sarà completato per il 2025 e consentirà di dimostrare la capacità di produrre energia con la fusione a confinamento magnetico.

Sezione della macchina ITER



I carichi termici ed il divertore

• Le pareti della camera che contiene il plasma vengono riscaldate dagli urti con le particelle che sfuggono dal campo magnetico e dalla radiazione che queste emettono nel loro moto elicoidale attorno alle linee di campo magnetico nel tokamak: il confinamento magnetico non è indefinito, ma dopo un certo tempo le particelle cariche urtano le pareti della camera perdendo parte della loro energia o venendo assorbite.



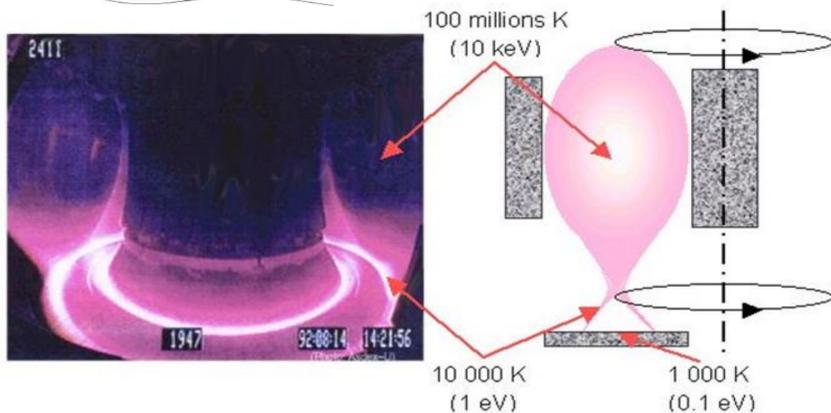
• Anche l'energia cinetica dei neutroni prodotti nelle reazioni nucleari e la potenza non assorbita della radiofrequenza utilizzata per riscaldare il plasma producono un ulteriore carico termico sulle pareti.

• Nelle macchine sperimentali questo calore deve essere estratto e dissipato all'esterno del tokamak. Nei futuri reattori a fusione verrà utilizzato, invece, per produrre energia generando vapore come in una centrale termica a combustione.

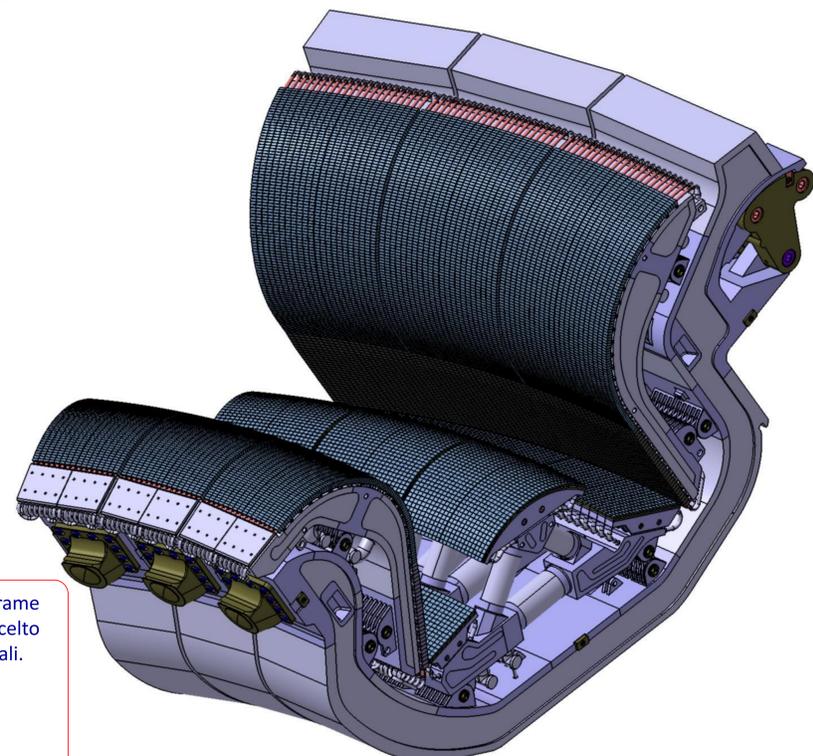
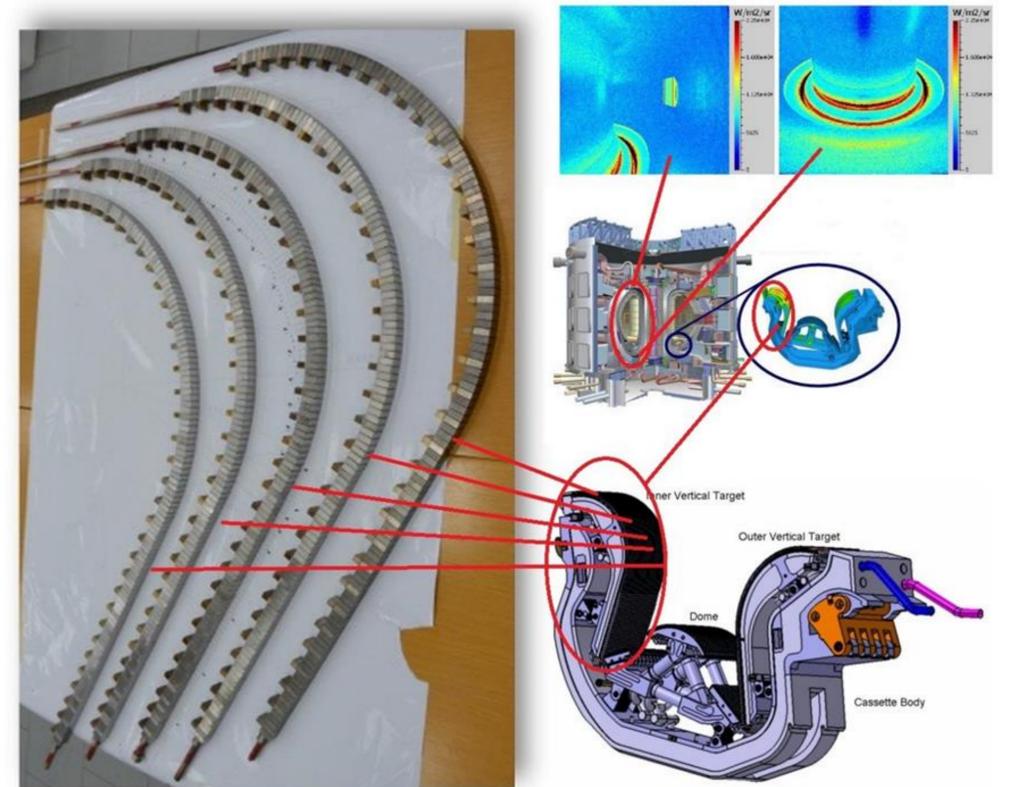
• Per migliorare il confinamento e quindi le prestazioni di un tokamak si utilizzano configurazioni magnetiche particolari, in cui la sezione del plasma confinato assume una particolare forma ad X che non tocca in nessun punto le superfici della camera. In queste configurazioni ad X le particelle cariche si muovono lungo le gambe inferiori della X e vanno a depositare la loro energia su due regioni (strike points) di un oggetto detto divertore che consente di ridurre le impurezze nel plasma e di dissipare una gran parte del carico termico.

• La densità di potenza termica incidente sul divertore può raggiungere valori di centinaia di MW/m² che non possono essere sostenuti da nessun materiale, pertanto occorre aumentare il più possibile la superficie solida esposta al flusso termico tramite l'inclinazione dei bersagli, l'espansione delle linee di campo magnetico e l'oscillazione (sweeping) degli strike points.

• Nonostante questi accorgimenti il flusso termico è sempre molto alto (decine di MW/m²), occorre pertanto utilizzare per questi bersagli dei materiali capaci di resistere a tali flussi e di dissipare il calore senza deformarsi e senza fondere, per evitare che la loro erosione introduca impurezze indesiderate nel plasma.



Plasma Facing Units nel divertore di ITER



• I componenti direttamente affacciati al plasma del divertore si chiamano Plasma Facing Units (PFU). Sono costituiti da tubi in lega di rame in cui scorre l'acqua di raffreddamento, rivestiti con materiale di "armour", armatura. Per il divertore di ITER il materiale di armatura scelto è il tungsteno. La giunzione fra armour e tubi a causa delle forti differenze di dilatazione termiche dei materiali richiede tecniche speciali.

• Le caratteristiche di progetto dei PFU richiedono l'utilizzo di:

- materiali resistenti al calore ed all'erosione;
- materiali ad alta diffusività termica per trasmettere il calore al fluido di raffreddamento;
- materiali che vengono danneggiati il meno possibile dai neutroni e che non intrappolino il trizio;
- piccole piastrelle (monoblocchi) per minimizzare gli effetti dell'espansione termica;
- superfici accuratamente lavorate ed allineate per rendere omogeneo l'angolo di incidenza delle particelle energetiche sui bersagli;
- adeguati circuiti di asportazione del calore per evitare rotture o deformazioni causate dai carichi termici ed elettromagnetici.