

Introduzione generale

L'energia gioca un ruolo fondamentale nella nostra società moderna. Con il sempre crescente sviluppo di tecnologie e il numero di applicazioni delle stesse, la richiesta energetica mondiale si stima che crescerà in modo continuo. Se continuiamo a usare i processi di produzione di energia attuali, a un certo punto la richiesta sarà più alta di quanto siamo in grado di soddisfare. Pertanto, queste lezioni vogliono mettere in luce una possibile soluzione al problema dell'energia del futuro: la fusione nucleare.

Questa serie di lezioni inizia con il modulo 1 *Basi della fusione*, che fornisce agli studenti le basi per comprendere tutti gli altri moduli. **Quindi il modulo 4 *Materiali per la Fusione* può essere usato solo dopo aver introdotto il contenuto del modulo 1.**

Questa serie di lezioni è pensata per istruzione pre-universitaria: livello ISCED 3-4.

Come usare i moduli

I moduli per gli studenti consistono di diversi materiali da lezione: i riquadri colorati in modo acceso, chiamati 'note', forniranno spiegazioni extra per approfondire alcuni argomenti. Questi sono da usare in maniera facoltativa in classe.

I riquadri colorati chiari forniscono invece esercizi per la classe. Questi possono essere usati durante la lezione per incentivare la discussione e possono servire da verifica per vedere se gli studenti hanno compreso il materiale.

Il contenuto completo di un modulo consiste in:

- Dispensa per studenti
 - o Include esercizi da fare in classe
- Esercizi aggiuntivi
- Una presentazione PowerPoint
 - o Include esercizi per la classe con soluzioni
- Manuale per l'insegnante
 - o Include le seguenti appendici
 - Tabella di costanti e fattori di conversione
 - Soluzioni agli esercizi per la classe
 - Soluzioni agli esercizi aggiuntivi

- EXTRA: Il Modulo 4 contiene inoltre un Annesso sulla superconduttività nella fusione. Questo è una breve estensione della Dispensa per studenti contenuta nel modulo, e che può essere usata per discutere il fenomeno della superconduttività e i suoi usi nella ricerca per la fusione.

Contenuti del manuale per l'insegnante

Introduzione generale	1
Come usare i moduli	1
Capitolo 1: Obiettivi d'apprendimento	3
Capitolo 2: Argomenti e lezioni affini.....	3
Capitolo 3: Argomenti del Modulo 4.....	3
Capitolo 4: Breve riassunto del modulo 4.....	4
Capitolo 5: Schemi della lezione	5
Lezione da 15 min per studente medio	6
Lezione da 15-20 min per studente avanzato	7
Lezione da 1 ora per studente medio.....	8
Lezione da 1 ora per studente avanzato	9
Capitolo 6: uso del PowerPoint e altri materiali.....	10
Capitolo 7: Letture aggiuntive per studio e divertimento per il modulo 4.....	10
Appendice A: tabella delle costanti.....	11
Appendice B: Soluzioni agli esercizi in classe.....	12

Capitolo 1: Obiettivi d'apprendimento

Alla fine di questo modulo, gli studenti saranno in grado di:

- Identificare le parti fondamentali di una macchina a fusione.
- Comprendere la scelta dei materiali per diversi componenti di un reattore a fusione.
- Comprendere le difficoltà legate alla dissipazione del calore e all'irraggiamento neutronico.
- Comprendere le necessità e problematiche legate agli elementi affacciati al plasma.
- Sapere i vari requisiti che i materiali affacciati al plasma devono soddisfare.
- Spiegare l'effetto dell'irraggiamento neutronico sui materiali.
- Spiegare le diverse funzioni del mantello (blanket).
- Capire la necessità di un sistema di raffreddamento.

Capitolo 2: Argomenti e lezioni affini

Assieme ai concetti discussi nel Modulo 1, i seguenti argomenti sono rilevanti:

- Parti fondamentali di una macchina a fusione (il tokamak)
- Materiali per diverse componenti
- Scienza dei materiali
- Fisica atomica
- Il ruolo dei neutroni prodotti dalle reazioni di fusione
- Elettricità
- Magnetismo

Capitolo 3: Argomenti del Modulo 4

Per ogni capitolo riportiamo gli argomenti fisici corrispondenti. Questo può essere usato per adattare il piano didattico in base alla conoscenza degli studenti e al tempo dedicato a lezione.

1. Introduzione alle componenti del tokamak e alle condizioni estreme

- Parti essenziali di un reattore a fusione (tokamak)
 - Pareti interne del reattore
 - Prima parete
 - Divertore
 - Blanket (mantello)
 - Magnetici superconduttori

2. Il problema della dissipazione del calore e dei materiali affacciati al plasma

- Il bisogno di dissipare il calore
- Le sfide del carico termico sul divertore
 - Scudi termici
 - Requisiti dei materiali per componenti affacciati al plasma
 - Possibilità per i materiali

3. Irraggiamento neutronico

- Effetti microscopici
- Effetti macroscopici
- Materiali resistenti a neutroni

4. Il Blanket e i suoi materiali

- I vantaggi dei neutroni
- Panoramica sul blanket
 - Produzione di trizio
 - Scambio termico
 - Fermare i neutroni

Capitolo 4: Breve riassunto del modulo 4

Il primo modulo dà un'introduzione ai principi di funzionamento del tokamak, la macchina per la fusione a forma di ciambella, e a come le reazioni di fusione generano energia nel plasma. Il modulo quattro invece si concentra sul tokamak e come l'energia si trasmette al suo interno per essere convertita in elettricità. Il modulo quattro discute le parti fondamentali del tokamak e i relativi problemi di materiali.

Il Capitolo uno dà un'introduzione alle condizioni estreme presenti all'interno di un tokamak, descrivendo le sue componenti fondamentali: le pareti interne del reattore, il blanket e i magneti superconduttori.

Il Capitolo due si concentra sul problema della rimozione del calore. È fondamentale capire come e perché l'enorme quantità di energia prodotta dalle reazioni di fusione sia un problema per la parete interna del reattore. Per questo è importante comprendere come l'energia, anche se confiniamo il plasma con campi magnetici, riesca a viaggiare sotto forma di calore fino ai componenti affacciati al plasma. La conoscenza derivata dal modulo 1 relativa alle reazioni di fusione e al confinamento magnetico è qui usata per spiegare perché le componenti della parete interna del tokamak debbano essere scudi termici. Si introducono anche la geometria e i complessi requisiti che questi scudi devono soddisfare. Si descrivono anche i possibili materiali per i componenti affacciati al plasma. Infine, si riportano, e si spiegano con immagini dell'interno del reattore, le scelte di materiali per ITER.

Il Capitolo tre inizia con una descrizione generale dei problemi dati dai neutroni prodotti dalle reazioni di fusione. I vari problemi sono relativi al fatto che i materiali del reattore sono soggetti a costante bombardamento da parte dei neutroni, che ne causa graduale degrado. Il capitolo tre descrive la natura microscopica di tale degrado e le sue conseguenze macroscopiche sulle proprietà dei materiali. Si riporta, con un esempio, un suggerimento su come questi problemi possano essere affrontati.

Al contrario del precedente, **il Capitolo quattro** inizia con i vantaggi dati dalla presenza dei neutroni e una descrizione generale del blanket. In un tokamak, le funzioni del blanket sono tutte legate ai vantaggi e svantaggi associati ai neutroni. Infine, il capitolo quattro descrive le tre funzioni fondamentali del blanket.

Il modulo si conclude suggerendo letture aggiuntive per approfondire, e menziona l'Annesso Superconduttività. Questa è una sezione complementare dedicata alla superconduttività e ai materiali superconduttori.

Capitolo 5: Schemi della lezione

Come nel primo modulo, ci sono due schemi base per le lezioni, da usare direttamente per lezioni brevi (15 minuti) o più lunghe (1 ora). Per questo modulo c'è una differenza per l'insegnamento a studenti medi o avanzati.

Lo scopo di questo capitolo è dare un'idea di com'è strutturata una lezione e ridurre la preparazione richiesta all'insegnante. Sentitevi liberi di adattare questo schema al vostro metodo di insegnamento. Per entrambi gli schemi di lezione, le attività degli studenti, la preparazione e le idee per la classe sono le stesse.

Le attività per gli studenti comprendono ascoltare, discutere, fare domande e lavorare sugli esercizi.

È da notare che nello schema sottostante, gli esercizi citati sono nella presentazione PowerPoint per il Modulo 4 e nella dispensa per studenti, con la stessa numerazione (l'esercizio 4.0 è presente solo nel PowerPoint!).

La preparazione per questa lezione prevede:

- Scaricare il PowerPoint
- Fornire agli studenti il materiale da leggere e gli esercizi aggiuntivi

Lezione da 15 min per studente medio

Questa lezione ha due obiettivi: primo, di introdurre le parti fondamentali del tokamak, e secondo, identificare le due principali e interessanti sfide per l'ingegneria dei materiali che gli scienziati della fusione devono affrontare. Gli esercizi da fare in classe per gli studenti sono veloci.

Ricorda che lo scopo finale è sempre di creare entusiasmo e curiosità, stimolando le capacità di ragionamento degli studenti utilizzando concetti di ingegneria della fusione e immagini visive.

I materiali richiesti per questa lezione sono:

- Dispensa per studenti
- Presentazione PowerPoint del Modulo 4

La preparazione per questa lezione richiede:

- Fare una copia della presentazione PowerPoint con solo le slide selezionate
- Fornire agli studenti il materiale da leggere

Durata	Attività dell'insegnante	Materiali	Attività per gli studenti
3 min	Introduzione: le componenti del tokamak	Capitolo 1: PowerPoint slide: da 2 a 6	Ascoltare, fare domande
2 min	Presentare il capitolo 2: Dissipazione del calore e componenti affacciati al plasma	Capitolo 2: PowerPoint slide 9 e 10	Ascoltare, fare domande
3 min	Esercizio 4.0. Presentare e spiegare le risposte.	Capitolo 2: PowerPoint slide 10 e 11	Lavorare in coppia all'esercizio. Discutere!
5 min	Presentare il capitolo 3 e 4: Irraggiamento neutronico e Materiali del Blanket	Capitolo 3 e 4: PowerPoint slide 20, 21, 29	Ascoltare, fare domande
3 min	Esercizio 4.3. Presentare e spiegare le risposte.	Capitolo 3: PowerPoint slide da 25 a 27	Lavorare in coppia all'esercizio. Ascoltare, fare domande e discutere

Lezione da 15-20 min per studente avanzato

Questa lezione ha due obiettivi: primo, di introdurre le parti fondamentali del tokamak, e secondo, identificare le due principali e interessanti sfide per l'ingegneria dei materiali che gli scienziati della fusione devono affrontare. Gli esercizi per studenti avanzati sono più lunghi e richiedono più ragionamento e/o conti.

Ricorda che lo scopo finale è sempre di creare entusiasmo e curiosità, stimolando le capacità di ragionamento degli studenti utilizzando concetti di ingegneria della fusione, immagini visive e conti.

I materiali richiesti per questa lezione sono:

- Dispensa per studenti
- Presentazione PowerPoint del Modulo 4

La preparazione per questa lezione richiede:

- Fare una copia della presentazione PowerPoint con solo le slide selezionate
- Fornire agli studenti il materiale da leggere

***Nota che l'esercizio 4.0 è solo nel PowerPoint (non nella dispensa per studenti).**

Durata	Attività dell'insegnante	Materiali	Attività per gli studenti
3 min	Introduzione: le componenti del tokamak	Capitolo 1: PowerPoint slide: da 2 a 6	Ascoltare, fare domande
2 min	Presentare il capitolo 2: Dissipazione del calore e componenti affacciati al plasma	Capitolo 2: PowerPoint slide 7 e 9	Ascoltare, fare domande
3-5 min	Esercizi 4.0 e 4.1. Presentare e spiegare le risposte.	Capitolo 2: PowerPoint slide da 10 a 13	Lavorare in coppia all'esercizio. Discutere!
5 min	Presentare il capitolo 3: Irraggiamento neutronico e Materiali del Blanket	Capitoli 3 e 4: PowerPoint slide da 19 a 21, 29	Ascoltare, fare domande
3-5 min	Esercizi 4.3 e 4.5. Presentare e spiegare le risposte.	Capitolo 3: PowerPoint slide da 25 a 27 e da 34 a 35	Lavorare in coppia all'esercizio. Ascoltare, fare domande e discutere
			Fare a casa gli esercizi 4.2 e 4.4

Lezione da 1 ora per studente medio

Gli obbiettivi, la preparazione e i materiali per la lezione da 1 ora sono gli stessi che per la lezione breve: primo, introdurre le parti fondamentali del tokamak, e secondo, identificare le due principali e interessanti sfide per l'ingegneria dei materiali che gli scienziati della fusione devono affrontare, per creare entusiasmo e curiosità, stimolando le capacità di ragionamento degli studenti.

Questa lezione da 1 ora punta ad introdurre i concetti in modo più approfondito, dando più dettagli e lasciando che gli studenti discutano e risolvano gli esercizi prima in modo autonomo, e poi discutendo in classe.

I materiali richiesti per questa lezione sono:

- Dispensa per studenti
- Presentazione PowerPoint del Modulo 4

La preparazione per questa lezione richiede:

- Fare una copia della presentazione PowerPoint con solo le slide selezionate
- Fornire agli studenti il materiale da leggere

***Nota che l'esercizio 4.0 è solo nel PowerPoint (non nella dispensa per studenti).**

Durata(~1h)	Attività dell'insegnante	Materiali	Attività per gli studenti
5 min	Introduzione: le componenti del tokamak	Capitolo 1: PowerPoint slides: da 2 a 6	Ascoltare, fare domande
5 min	Introdurre il capitolo 2: Dissipazione del calore e componenti affacciati al plasma	Capitolo 2: PowerPoint slides da 7 a 9	Ascoltare, fare domande
~8 min	Esercizi 4.0 e 4.1.	Capitolo 2: PowerPoint slides da 11 a 14	Lavorare da soli per 4 minuti sull'esercizio. Poi discuterne la soluzione col resto della classe.
5 min	Introdurre altri requisiti per componenti affacciati al plasma e scelte di materiali per ITER	Capitolo 2: PowerPoint slides 14, 17-18	Ascoltare, fare domande
~8 min	Esercizio 4.2.	Capitolo 2: PowerPoint slides da 15 a 16	Lavorare da soli per 4 minuti sull'esercizio. Poi discuterne la soluzione col resto della classe.
10 min	Presentare il capitolo 3: Irraggiamento Neutronico	Capitolo 3: PowerPoint slides da 19 a 24	Ascoltare, fare domande
5 min	Esercizio 4.4. Presentare e spiegare le risposte.	Capitolo 3: PowerPoint slides da 25 a 27	Lavorare da soli per 2 minuti sull'esercizio. Poi discuterne la soluzione col resto della classe.
10 min	Presentare il capitolo 4: Materiali del Blanket	Capitolo 4: PowerPoint slides da 29 a 31	Ascoltare, fare domande
5 min	Esercizi 4.3, 4.4	Capitolo 4: PowerPoint slides 32-35	Discussione aperta

Lezione da 1 ora per studente avanzato

Gli obbiettivi, la preparazione e i materiali per la lezione da 1 ora sono gli stessi che per la lezione breve: primo, introdurre le parti fondamentali del tokamak, e secondo, identificare le due principali e interessanti sfide per l'ingegneria dei materiali che gli scienziati della fusione devono affrontare.

Ricorda che lo scopo finale è sempre di creare entusiasmo e curiosità, stimolando le capacità di ragionamento degli studenti utilizzando concetti di ingegneria della fusione, immagini visive e conti.

I materiali richiesti per questa lezione sono:

- Dispensa per studenti
- Presentazione PowerPoint del Modulo 4

Se gli studenti conoscono già gli argomenti, o se hanno dimostrato di essere interessati e capaci di ragionare e/o fare i conti, allora si può proporre una lezione inversa, dove il ruolo di studenti e insegnante è invertito. L'insegnante fa solo domande, e gli studenti devono spiegare gli argomenti. Il suggerimento per la lezione avanzata è di stimolare gli studenti con esercizi e lasciare che discutano tra loro se emerge un disaccordo. Gli esercizi in classe possono essere usati per dare agli studenti un assaggio dell'argomento, prima della vera e propria presentazione dell'insegnante.

Durata(~1h)	Attività dell'insegnante	Materiali	Attività per gli studenti
5 min	Introduzione: parti del tokamak	Capitolo 1: PowerPoint slides: 2-6	Ascoltare, fare domande
8 min	Introdurre e lasciare che gli studenti discutano gli Esercizi 4.0 e 4.1	Capitolo 2: PowerPoint slides 10-13	Lavorare da soli per 4 minuti all'esercizio. Quindi discutere con la classe/a gruppi di 4
5 min	Introdurre il capitolo 2: Dissipazione del calore e componenti affacciati al plasma	Capitolo 2: PowerPoint slides 7-9	Ascoltare, fare domande
8 min	Introdurre e lasciare che gli studenti discutano l' Esercizio 4.2	Capitolo 2: PowerPoint slides 15-16	Lavorare da soli per 4 minuti all'esercizio. Quindi discutere con la classe/a gruppi di 4
5 min	Presentare gli altri requisiti per i componenti affacciati al plasma e le scelte di materiali per ITER	Capitolo 2: Power Point slides 14, 17, 18	Ascoltare, fare domande
5 min	Introdurre l' Irraggiamento neutronico e introdurre l'esercizio 4.3 a)	Capitolo 3: PowerPoint slides 25-27	Lavorare da soli per 2 minuti all'esercizio. Quindi discutere con la classe/a gruppi di 4
10 min	Presentare il capitolo 3: Irraggiamento neutronico	Capitolo 3: PowerPoint slides 20-28	Ascoltare, fare domande
5 min	Esercizio 4.3. Presenta e spiega le risposte	Capitolo 3: PowerPoint slide 25-27	Lavorare da soli per 2 minuti all'esercizio. Quindi discutere con la classe
5 min	Introdurre il blanket e lasciare che gli studenti discutano l' Esercizio 4.5	Capitolo 4: PowerPoint slide 29, 35,36	Discussione aperta
10 min	Presentare il capitolo 4: Materiali del Blanket	Capitolo 4: PowerPoint slide 29-32	Ascoltare, fare domande

Capitolo 6: uso del PowerPoint e altri materiali

C'è un PowerPoint disponibile (per ogni modulo) al sito: <https://fusenet.eu/education/material>.

Il PowerPoint contiene l'intero modulo, inclusi esercizi e risposte, e può essere usato direttamente in classe. Per un riepilogo dei materiali aggiuntivi, vedi il capitolo 7. È possibile adattare il PowerPoint agli argomenti che trattati in classe.

Per introdurre i vari argomenti del modulo 4, è possibile dare agli studenti esercizi in preparazione da svolgere a casa, per ogni argomento. Per la preparazione, si può sfruttare anche qualche fonte tratta da 'Lecture aggiuntive per studio e divertimento'. Vedasi il capitolo 7.

Capitolo 7: Letture aggiuntive per studio e divertimento per il modulo 4

Per insegnanti

Il seguente link contiene informazioni generali sull'argomento (in inglese) per gli insegnanti di questo modulo. Lo scopo è di usarlo per ampliare la propria conoscenza e comprensione dell'argomento. È comunque possibile usare questo materiale in classe, sebbene vada adattato al livello degli studenti. Alcuni siti danno informazioni su argomenti contenuti, o collegati, a questo modulo. Sotto ogni URL si trova una breve introduzione del contenuto

- Sito FuseNet- <https://www.fusenet.eu/education/material> Qui trovate gli altri quattro moduli. Inoltre, vi si trovano articoli teorici, corsi ed esperimenti su argomenti collegati a questa serie di lezioni.

Per insegnanti e studenti

Alla fine del modulo potete trovare materiale aggiuntivo da leggere. Il materiale in questo capitolo può essere usato per fornire spiegazioni aggiuntive agli studenti. Alcuni URL affrontano più nel dettaglio i vari argomenti o danno esempi di esperimenti. Dopo ogni URL, vengono riportate alcune informazioni circa il contenuto e l'uso possibile.

Appendice A: tabella delle costanti

Quantità	Quantità	Fattore di conversione in SI
Energia ¹	1 caloria	4.184 J
Energia ³	1 toe*	$4.2 * 10^{10}$ J
Energia ¹	1 kWh*	$3.6 * 10^6$ J
Massa ¹	1 Ton	$1.0 * 10^3$ kg
Massa ¹	1 amu/u/ame	$1.66 * 10^{-27}$ kg
Temperatura ¹	0 °C	273.15 K
Pressione ¹	1 bar	$1.0 * 10^5$ Pa

Tabella A.1 fattori di conversione

Quantità	
Temperatura del nucleo del Sole ²	$1.571 * 10^7$ K
Temperatura superficiale del Sole ¹	5780 K
Densità (media) del Sole ²	1408 kg/m^3
Densità del nucleo del Sole ²	$1.622 * 10^5 \text{ kg/m}^3$
Pressione del nucleo del Sole ²	$2.477 * 10^{11}$ bar
Temperatura superficiale della Terra ¹	295 K
Densità (media) della Terra ²	5514 kg/m^3
Massa del elettrone ¹	$9.109 * 10^{-31}$ kg
Carica dell'elettrone ¹	$1.602 * 10^{-19}$ C
Massa del protone ¹	$1.673 * 10^{-27}$ kg
Carica del protone ¹	$1.602 * 10^{-19}$ C
Massa del neutrone ¹	$1.675 * 10^{-27}$ kg

Tabella A.2 costanti

¹ Noordhoff uitgevers & NVON (2021). *Binas HAVO/VWO Informatieboek 6de editie (6e havo/vwo)* (01 ed.). Groningen, Nederland: Noordhoff Uitgevers.

² Sun Fact Sheet. (2018). Retrieved 13 July 2021, from <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

³ IEA Unit converter and glossary, for common energy units. From <https://www.iea.org/reports/unit-converter-and-glossary>

Appendice B: Soluzioni agli esercizi in classe

Esercizio in classe 4.0

I tokamak sfruttano un campo magnetico per tenere il plasma caldo confinato e ben separato dalle pareti interne del reattore. Fornisci almeno una motivazione sul perché è necessario avere un sistema di dissipazione del calore in un reattore a fusione commerciale.

Per impedire la fusione dei materiali, ma anche per rimuovere le ceneri d'elio dal reattore (vedi anche la pagina 6 della dispensa per studenti)

Esercizio in classe 4.1

Il carico termico al divertore in ITER è stimato essere 10 MW/m^2 . Ma quanto è? Confrontalo con la massima energia generata da una lancia termica, che 'brucia' ferro con un calore di combustione di 4.23 KJ/g .

- (a) Qual è l'energia generata da una lancia termica bruciando 3 grammi di ferro?

$$\left(4.23 \frac{\text{KJ}}{\text{g}} \cdot 3\text{g} \approx 12\text{KJ} \right)$$

- (b) Quanta energia colpisce 1 m^2 di materiale del divertore in un millisecondo di esposizione al flusso termico di ITER?

$$\left(10 \cdot \frac{10^6\text{J}}{\text{s}\cdot\text{m}^2} \cdot 0.001\text{s} \cdot 1\text{m}^2 \approx 10 \text{ KJ} \right)$$

- (c) Confronta i risultati dei punti precedenti. Sapendo che una lancia termica si può usare per tagliare l'acciaio delle casseforti di una banca, cosa ci fa capire questo sui requisiti che deve soddisfare il divertore?

(In solo un millisecondo, un metro quadro del divertore riceve quasi la stessa energia che un'intera carica di una lancia termica può produrre. È tantissimo! La temperatura del divertore sale molto. Per evitare la fusione, il materiale deve 1) avere un'alta temperatura di fusione e 2) essere un buon conduttore di calore per scaricare tutto questo calore senza scaldarsi troppo.)

Esercizio in classe 4.2

Nell'esercizio 4.1 abbiamo fatto qualche calcolo di carico termico. Ci chiediamo ora: quale materiale può resistere a un carico termico del genere senza fondersi? Serve qualche sistema di raffreddamento attivo per mantenere il materiale sotto il punto di fusione?

Per calcolare la temperatura, possiamo approssimare il divertore come un perfetto corpo nero. Un corpo nero irraggia (emettendo potenza) secondo la legge di Stefan-Boltzmann:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \sigma_B A T^4$$

Dove P è la potenza emessa in watt, $\sigma_B = 5,67 \times 10^{-8} \text{ J}/(\text{s} \times \text{m}^2 \times \text{K}^4)$ è la costante di Stefan-Boltzmann, A è l'area del corpo nero e T è la temperatura superficiale. Supponendo di avere un divertore di 1 m^2 e assumendo che tutti i $10 \text{ MW}/\text{m}^2$ siano dissipati per irraggiamento.

- a) Qual è la temperatura superficiale?

$$\left(T = \left(\frac{10 \left[\frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \right]}{\sigma_B A} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{1015}{5.67} \right)^{\frac{1}{4}} = \sim 3650 \text{ K} = 3923,15 \text{ }^\circ\text{C} \right)$$

- b) Come si colloca rispetto alla temperatura di fusione* dei seguenti materiali?

Tungsteno (**3.422 °C**) Ferro (**1538 °C**) Carbonio* (**3643°C**) Berillio (**1287 °C**)

- c) Cosa si può concludere riguardo al raffreddamento? È possibile per un materiale irraggiare tutto il calore e rimanere sufficientemente freddo (passivamente) o è necessario un sistema di raffreddamento attivo? Perché?

(Nessun materiale può irradiare tanta potenza senza fondere! Serve raffreddarlo attivamente. È necessario rimuovere continuamente calore dal materiale con un sistema di raffreddamento. Per questo ci servono materiali con ottime proprietà di conduzione del calore!)

Esercizio in classe 4.3

- a) Elenca tre diversi effetti macroscopici negativi che avvengono sui materiali a causa dell'irraggiamento da neutroni.
(Swelling, incrudimento e fragilimento, vedi slide 22 della presentazione)
- b) Avete appena imparato cos'è lo swelling, riuscite a immaginare perché costituisca un problema per un reattore a fusione? Potete fare un esempio?

(Lo swelling provoca problemi alla struttura meccanica! Fa sì che i componenti delle pareti interne del reattore si rompano più facilmente! Vedi slide 27 della presentazione.)

Esercizio in classe 4.4

In un reattore, il blanket deve essere fortemente e attivamente raffreddato. Perché?

(Perché i neutroni, collidendo con gli atomi dei materiali, scaldano le componenti del blanket. Vogliamo sfruttare tale calore per produrre elettricità, quindi dobbiamo attivamente raffreddare il blanket.)

Esercizio in classe 4.5

In un tokamak, quali sono le funzioni più importanti del blanket?

(Produzione di trizio, scambio termico e arresto dei neutroni. Si vedano le slides 29-31 della presentazione.)

This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

