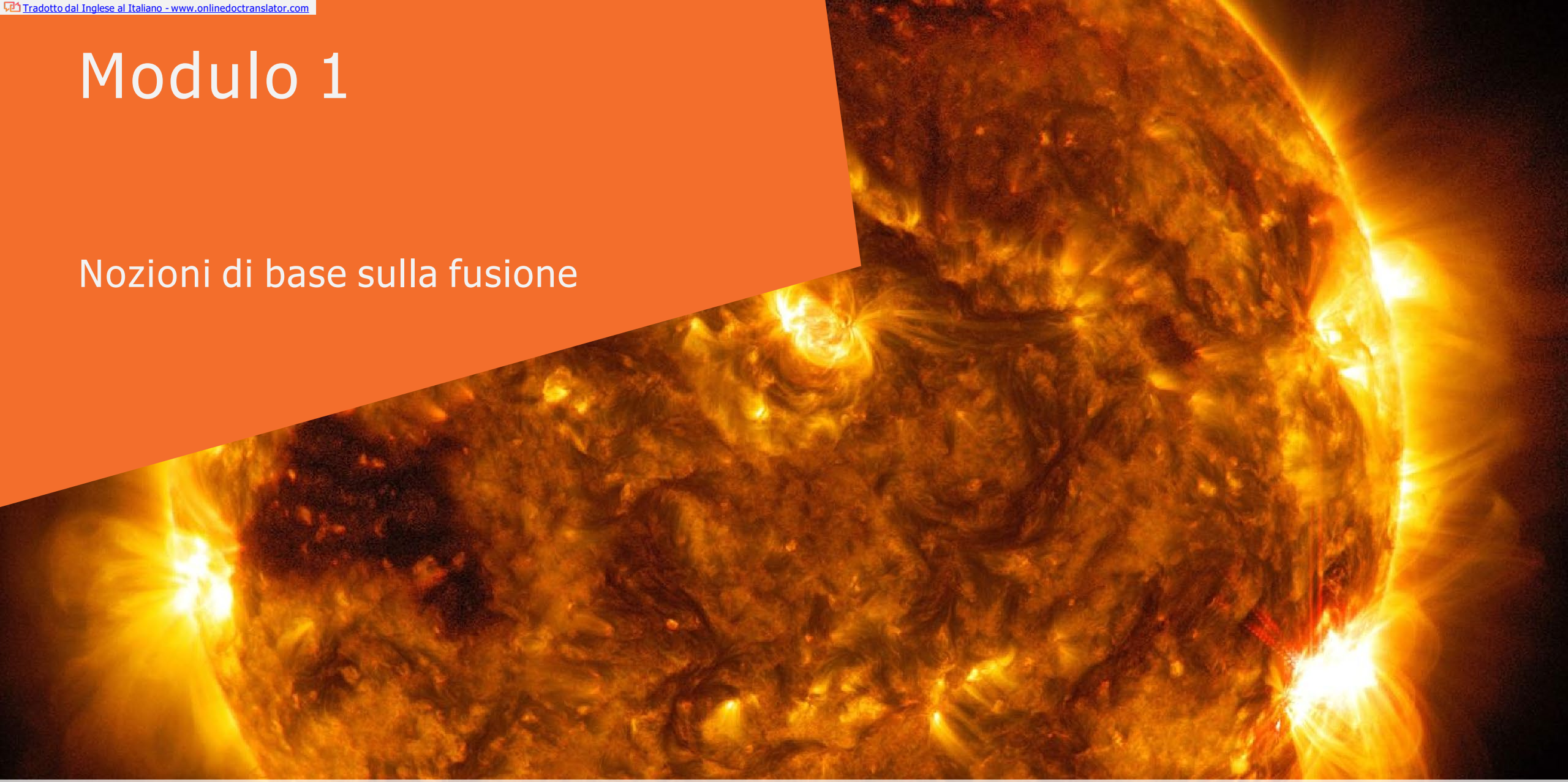
Tradotto dal Inglese al Italiano - www.onlinedoctranslator.com

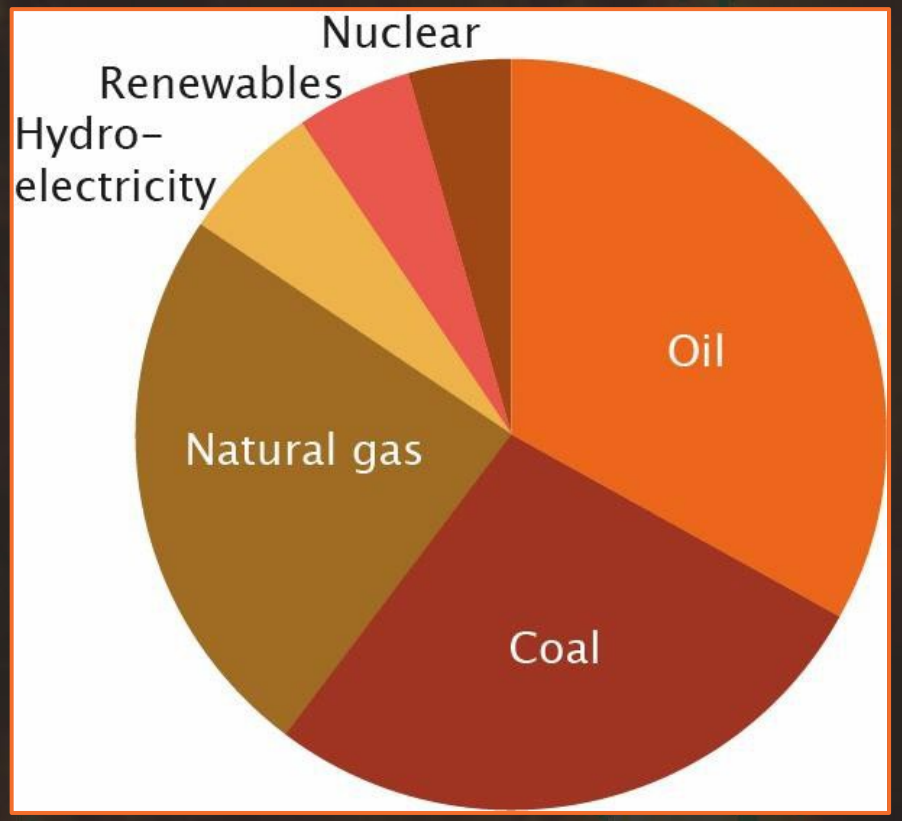
Modulo 1

Nozioni di base sulla fusione



1.1 L'energia e il suo ruolo nel nostro mondo

- Il mix energetico
  - Rinnovabile vs non rinnovabile



Fonte: BP Statistical Review of World Energy, 2020.

Esercitazione in aula 1.1

(a)Stima quale percentuale dell'energia del tuo paese è creata da fonti di energia rinnovabile come solare, eolica, idroelettrica, ecc. Spiega come hai raggiunto la tua stima. Hai fatto delle ipotesi?

(b)Confronta la tua stima con la stima di almeno un altro studente. Le stime differiscono molto? Confronta il ragionamento alla base delle stime: hai fatto ipotesi diverse?

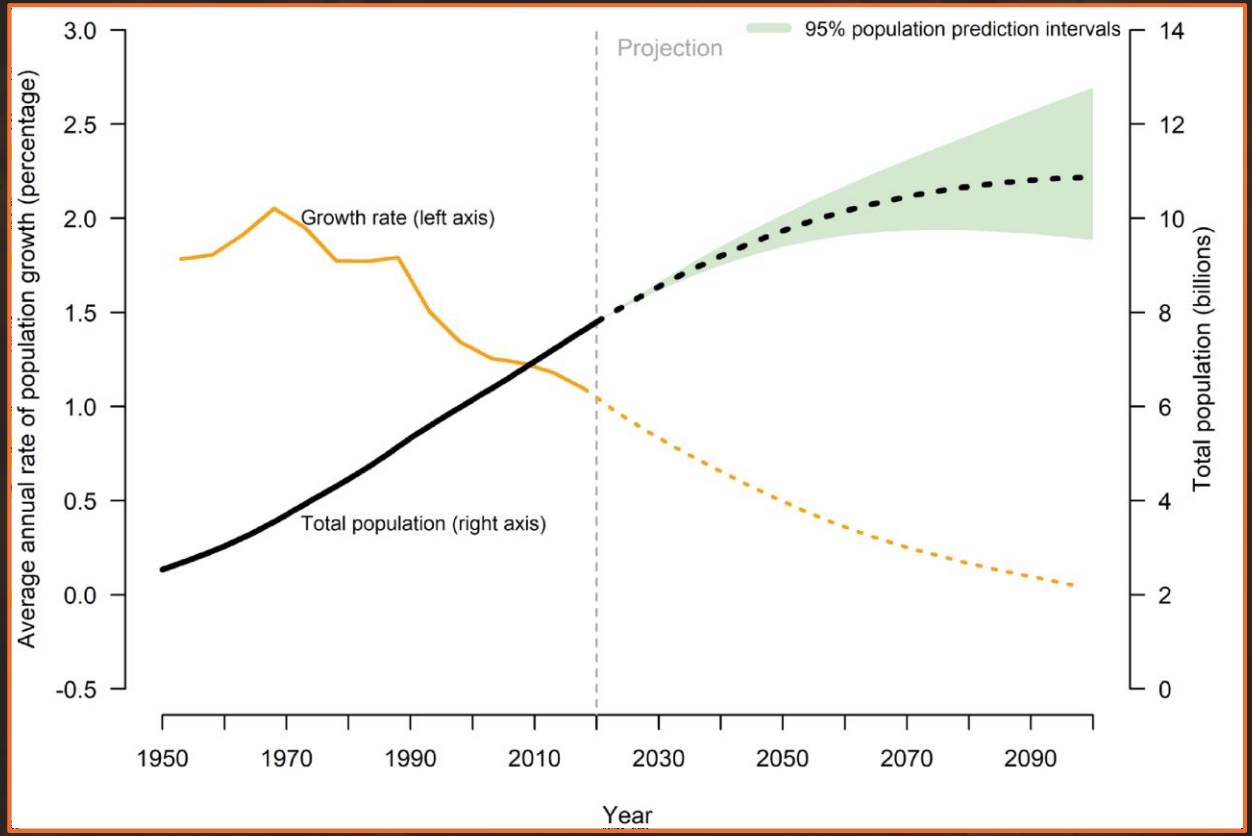
(c)Cerca il mix energetico del tuo paese. Confronta le tue stime con i dati. Le tue stime erano vicine?

Esercizio in aula 1.1 - risposte

- Discutere!

Il problema energetico

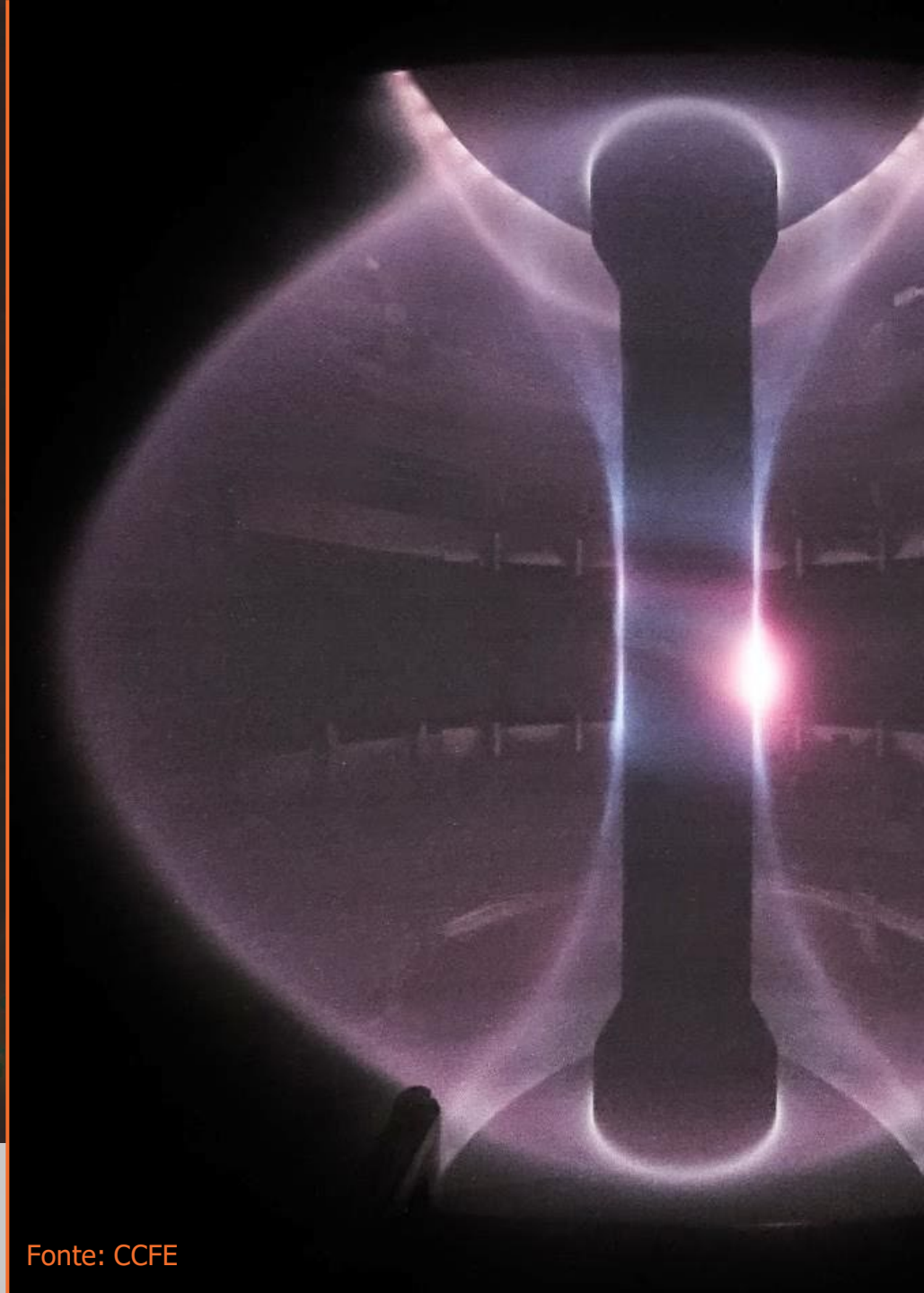
- Problema
  - Crescente popolazione
  - Crescente consumo di energia
  - Fonti nocive all'ambiente



Fonte: Nazioni Unite, Dipartimento degli Affari Economici e Sociali, Divisione Popolazione (2019). Prospettive della popolazione mondiale 2019: punti salienti. ST/ESA/SER.A/423.

Il problema energetico

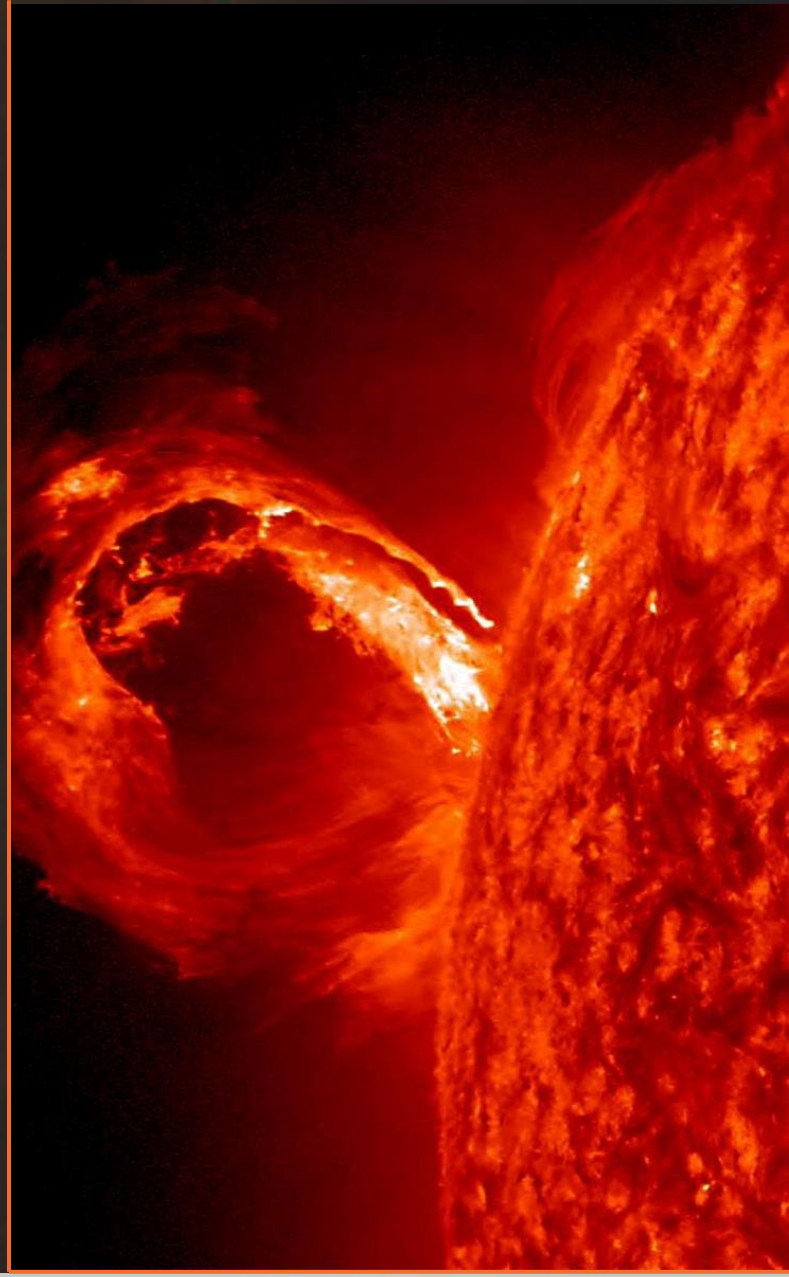
- Soluzioni
  - Decrescente fabbisogno energetico
  - Crescente ricorso a fonti sostenibili
- Come?
  - Migliore conservazione
  - Risorse di energia alternativa
  - Soluzione di backup: Fusione nucleare!



Fonte: CCFE

1.2 Fusione all'interno del nostro sole

- Il Sole
  - Stella
  - Tenuto insieme da gravità
  - Immensa pressione
  - In equilibrio
- Prende la sua energia dalla fusione!
  - Diamo un'occhiata davvero da vicino!

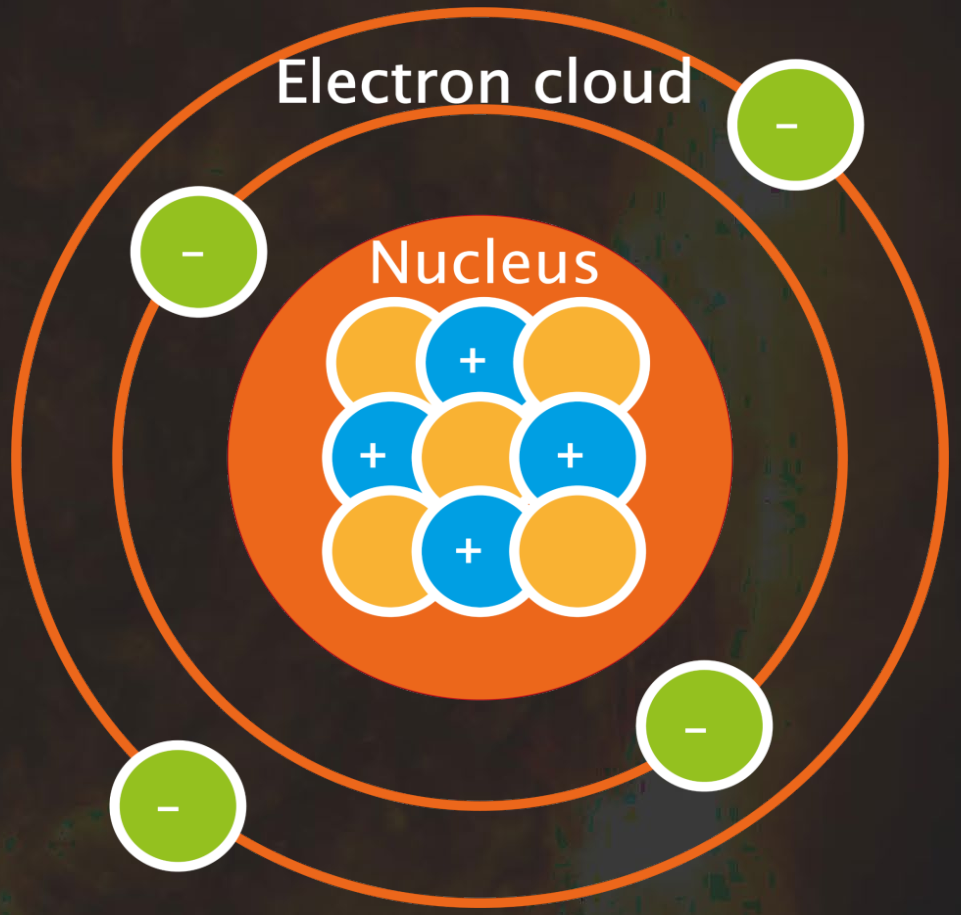


Fonte: NASA

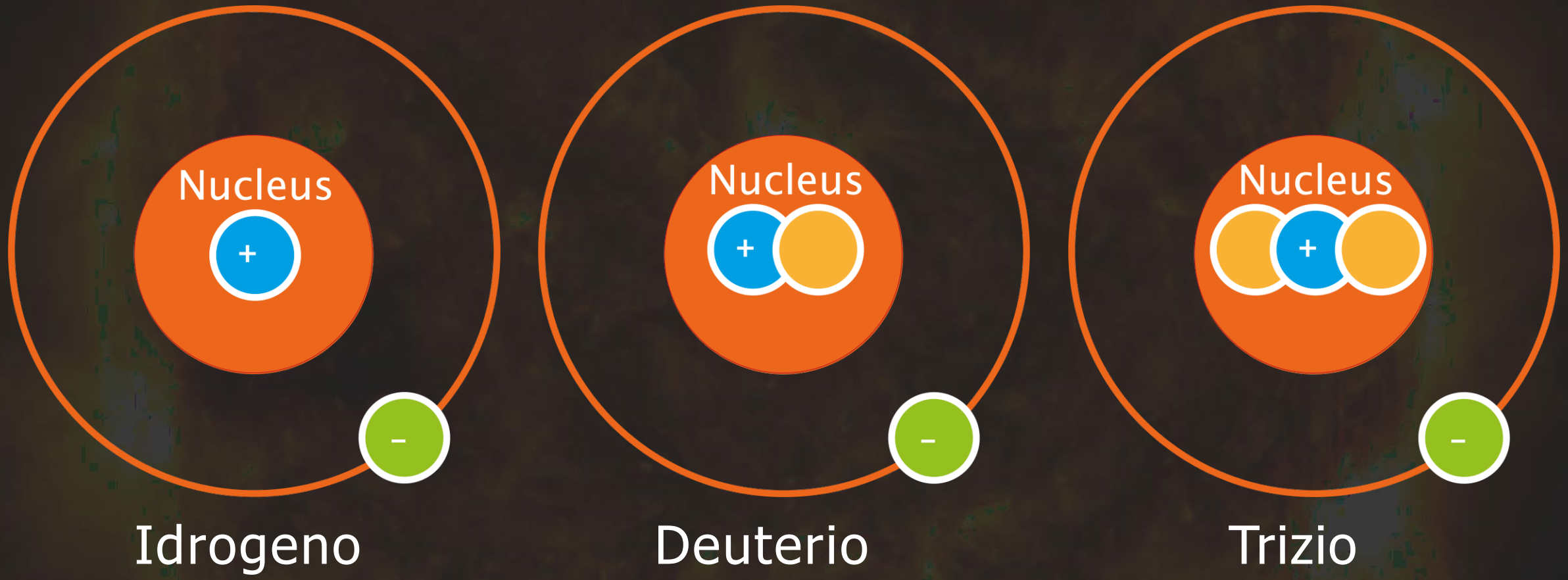
Dentro l'atomo

- Nucleo
  - Protone: determina il tipo di elemento, carica positiva
  - Neutrone: determina il tipo di isotopo, senza alcuna carica

- Nube di elettroni
  - Elettrone: determina carica/ione, carica negativa

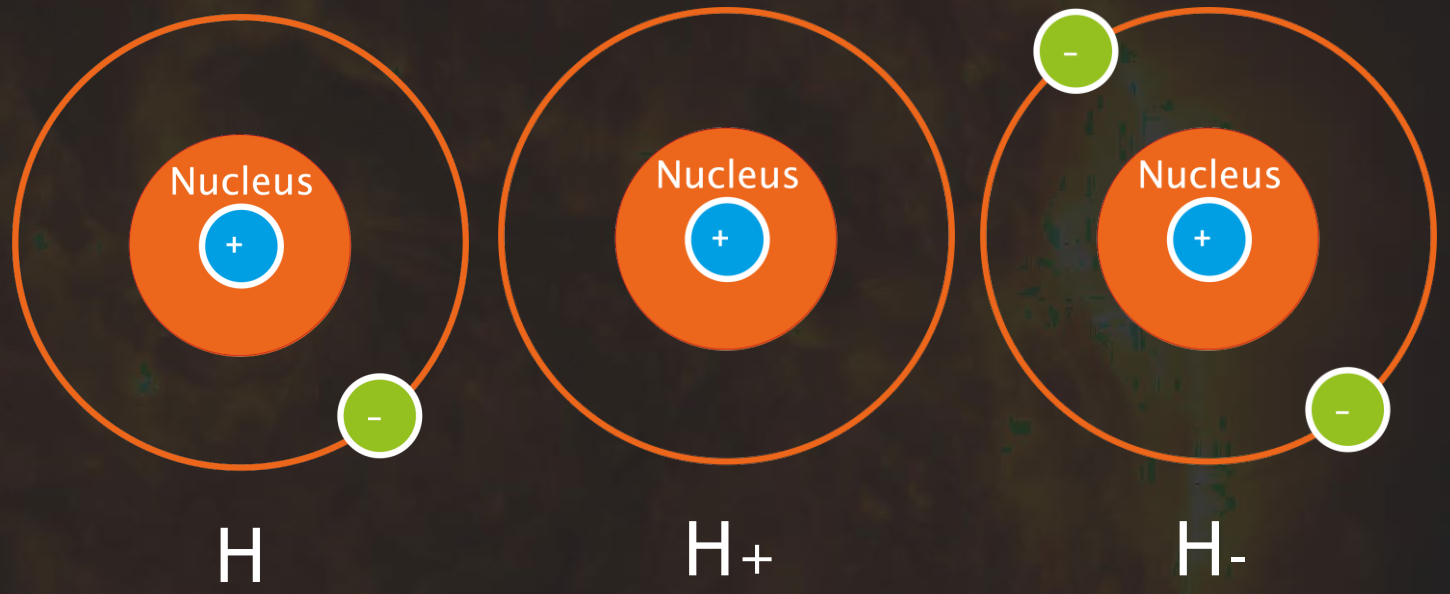


Isotopi



Atomi e ioni

- Atomo
  - Neutro
- Ione
  - Carico
  - Può essere positivo o negativo



Carica

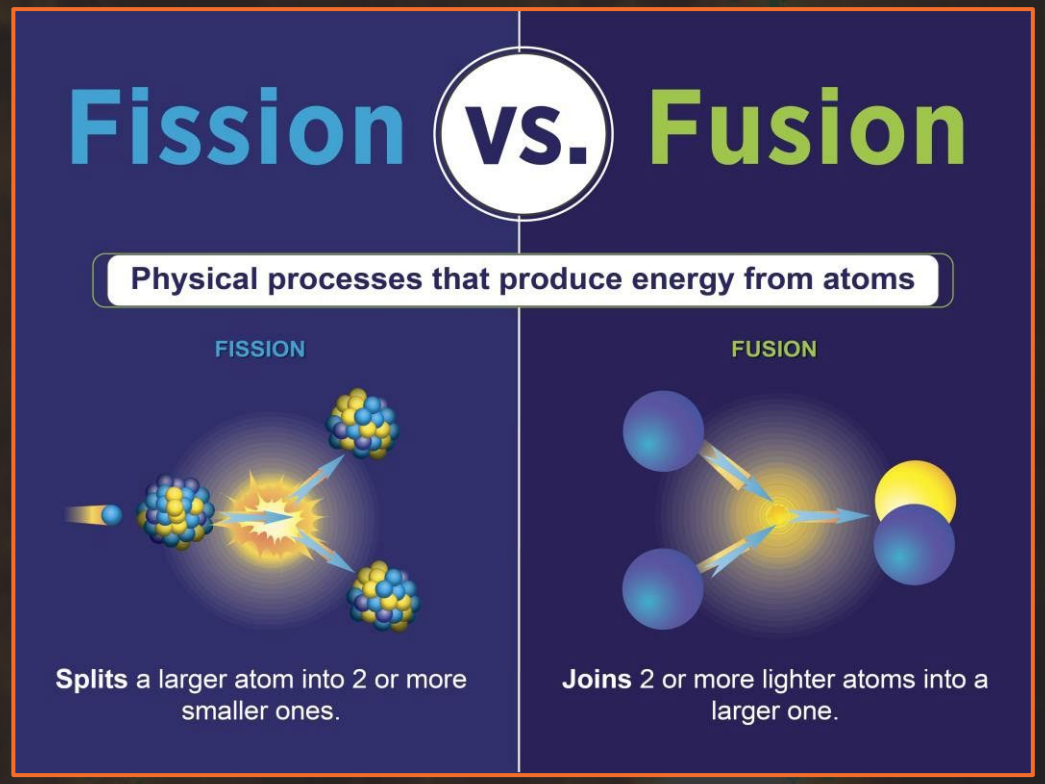
- Le particelle cariche interagiscono tra loro

Attrazione: (+/-)

Repulsione: (+/+) o (-/-)

Reazioni nucleari

- Fissione
  - Un nucleo pesante si divide in due (o più) parti e rilascia energia
- Fusione
  - Due nuclei leggeri si fondono insieme per formare un nucleo più pesante e rilasciare energia



Grafica di Sarah Harman | Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti

La reazione di fusione nucleare

- La più semplice: Fusione D-T

$$^{2}H + ^{3}H \rightarrow ^{4}He + n + 17{,}6\ MeV$$

- Deuterio e trizio
- Due isotopi dell'idrogeno

17,6 MegaV = 0,00000000000282 Joule → molta energia da due piccolissime particelle!

1 anno = $1{,}661 \times 10^{-27}$ kg

= 0,000000000000000000000000001661 kg

Esercitazione in aula 1.2

Il concetto di densità di energia è importante in fisica e sebbene sembri difficile, si riduce a "quanta energia c'è dentro un certo volume di roba". Se si brucia 1 litro di benzina e si misura la quantità di energia che viene rilasciata (sotto forma di calore) e la si divide per il volume bruciato, si ottiene una misura della densità di energia. Per tutti i combustibili è possibile determinare una densità energetica.

a) Tra i combustibili elencati di seguito, quale immagini che abbia la più alta densità di energia? Quale pensi che abbia la densità di energia più bassa? Ordinali dal più alto al più basso.

b) Confronta la tua graduatoria con quella di almeno un altro studente. Discuti perché li hai inseriti in questo ordine.

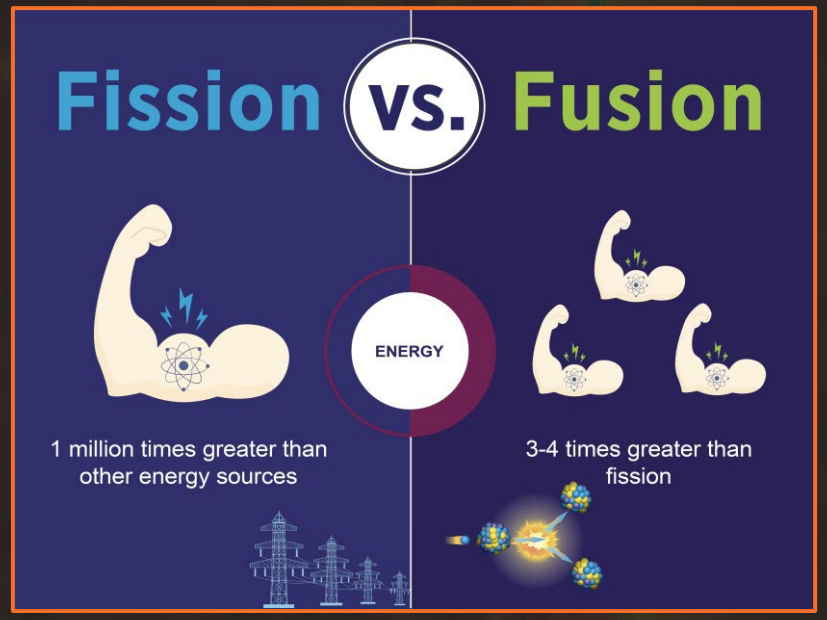
c) Cercare le densità di energia. Confronta le tue classifiche con i dati. Le tue stime erano vicine?

Benzina – petrolio – carbone – legna – idrogeno (gas) – etanolo – Deuterio – Uranio

Esercizio in aula 1.2 – risposte

Dall'alto al basso:

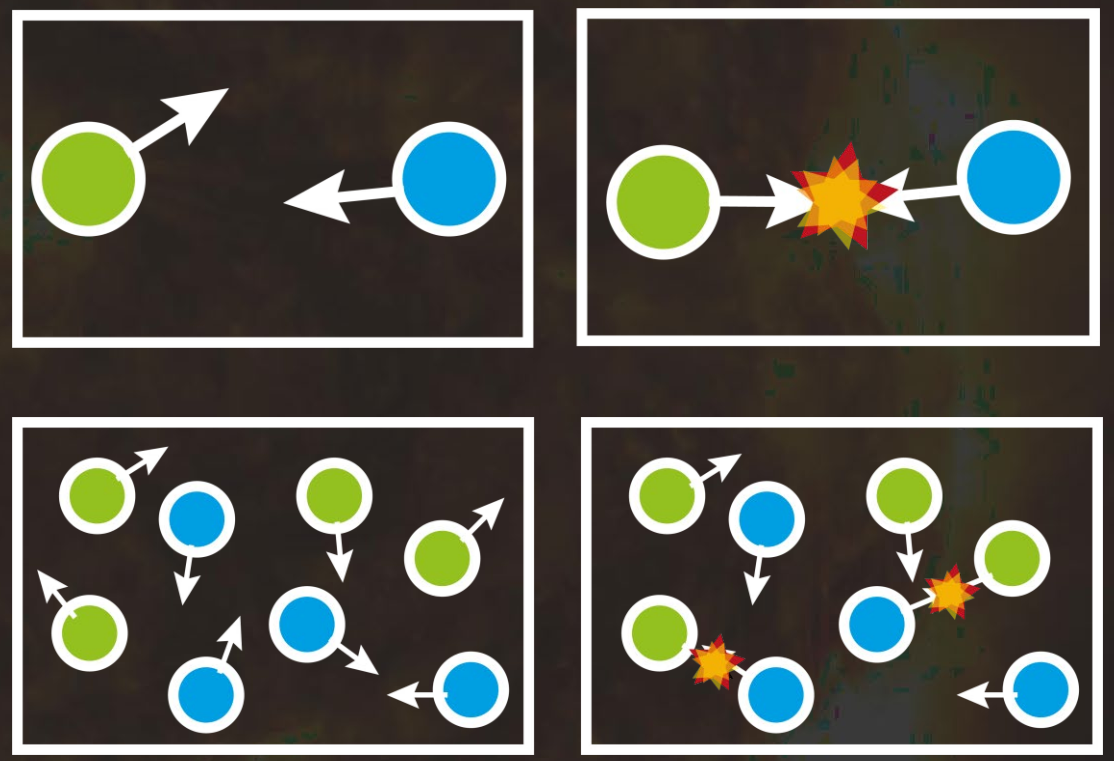
1. Deuterio
2. Uranio
3. Carbone
4. Olio
5. Benzina
6. Etanolo
7. Legno
8. Idrogeno (gas)



Grafica di Sarah Harman | Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti

Criteri per la fusione

- Abbiamo bisogno:
- Alta temperatura (= alta velocità)
  - Alta densità
- E:
  - Tempo di confinamento energetico

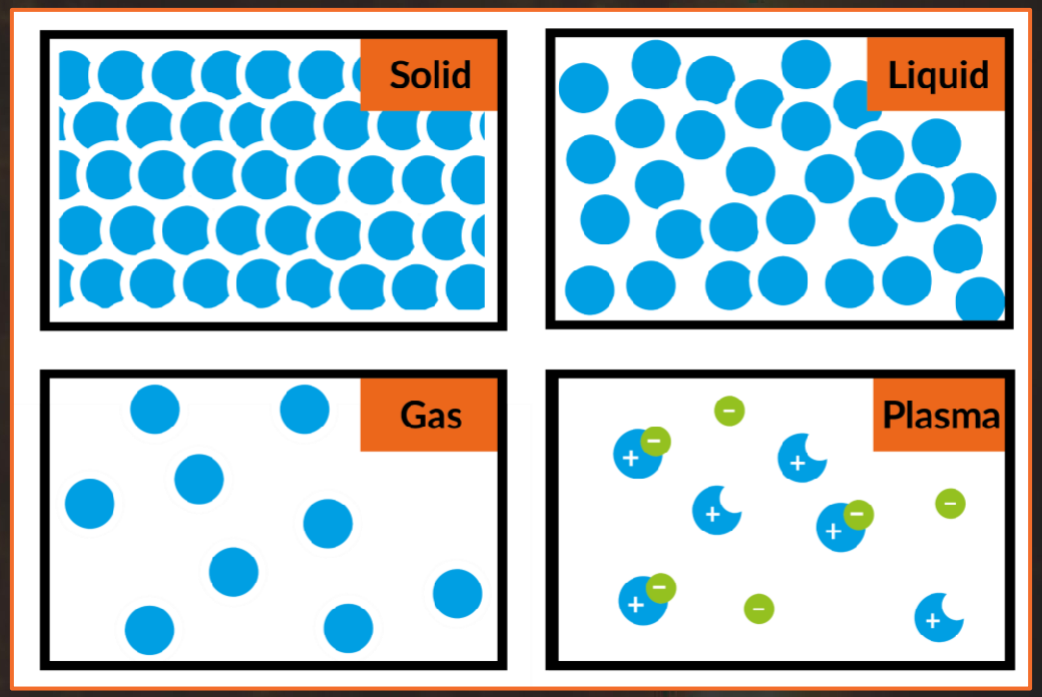


Criteri per la fusione

- Nel Sole: gravità
  - Porta a condizioni estreme e confina l'energia per lungo tempo
- Sulla Terra: abbiamo bisogno di un altro modo
  - Reattori a fusione
  - Plasma!

1.3 Plasma

- Il 'quarto' stato della materia
- Gas ionizzato
  - Contiene cariche elettriche libere di muoversi:
    - Ioni positivi
    - Elettroni negativi
- Plasma completamente ionizzato
  - Se ha solo ioni ed elettroni



Ionizzazione vs cambiamento di fase

- **Ionizzazione**
- Gas
- Alta pressione e temperatura
- Come avviene:
  Si rompono i legami nell'atomo
- Condizione di rottura
  - Energia superiore a energia di ionizzazione

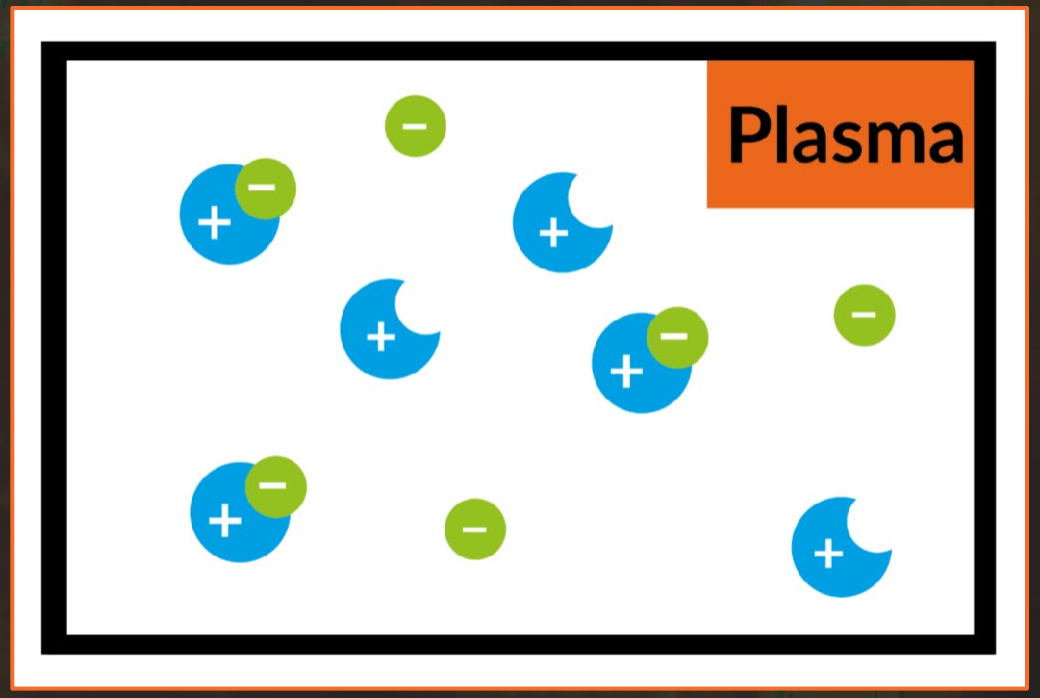
- **Cambio di fase**
- Solido/liquido/gas
- A pressione e temperatura specifiche
- Come avviene:
  si rompono i legami *tra* gli atomi
- Condizione di rottura
  - Energia superiore a energia di soglia

Conducibilità del plasma

- Il plasma è costituito da particelle cariche che si muovono liberamente

- Può condurre elettricità
  - Correnti nel plasma

- Sensibile a
  - Campi elettrici
  - Campi magnetici



Esempi di plasma

- Lo stato della materia più comune nell'universo!

- Aurora boreale (aurora boreale)
- Luci al neon
- Fulmine
- Scarica plasmatica
- Sole
- All'interno di un tokamak

Esercizio in aula 1.3 – scelta multipla

Abbiamo visto che la differenza tra un plasma e un gas sta nella massa delle particelle cariche o neutre. Tuttavia, la maggior parte dei plasmi può essere osservata brillare, mentre i gas sono spesso incolori e sicuramente non brillano. Allora perché i plasmi si illuminano?

a) A temperature sufficientemente elevate tutto inizierà a irradiarsi, quindi i plasmi si illuminano naturalmente a causa dell'alta temperatura.

b) Le particelle cariche si muovono liberamente e una volta che un elettrone libero e uno ione entrano in collisione, c'è la possibilità che si ricombinino. In questo processo di ricombinazione le particelle cariche si combinano in una particella neutra e viene emessa luce. Se la luce emessa si trova nello spettro visibile, il plasma inizierà a brillare.

c) In alcune reazioni nucleari viene emessa luce. Se la luce emessa si trova nello spettro visibile, il plasma inizierà a brillare.

Esercizio in aula 1.3 – risposta

Quindi, la differenza tra un plasma e un gas sta nella massa delle particelle cariche o neutre. Tuttavia, la maggior parte dei plasmi può essere osservata brillare, mentre i gas sono spesso incolori e sicuramente non brillano. Allora perché i plasmi si illuminano?

a) A temperature sufficientemente elevate tutto inizierà a irradiarsi, quindi i plasmi si illuminano naturalmente a causa dell'alta temperatura.

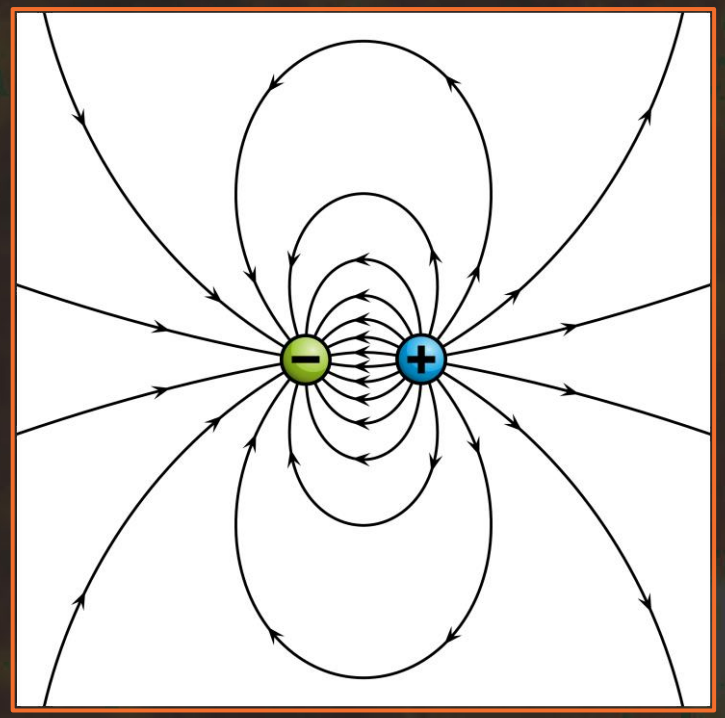
b) Le particelle cariche si muovono liberamente e una volta che un elettrone libero e uno ione entrano in collisione, c'è la possibilità che si ricombinino. In questo processo di ricombinazione le particelle cariche si combinano in una particella neutra e viene emessa luce. Se la luce emessa si trova nello spettro visibile, il plasma inizierà a brillare.

c) In alcune reazioni nucleari viene emessa luce. Se la luce emessa si trova nello spettro visibile, il plasma inizierà a brillare.

Campo elettrico

- Influenza della carica sull'ambiente circostante
- Campo forte vicino alla carica

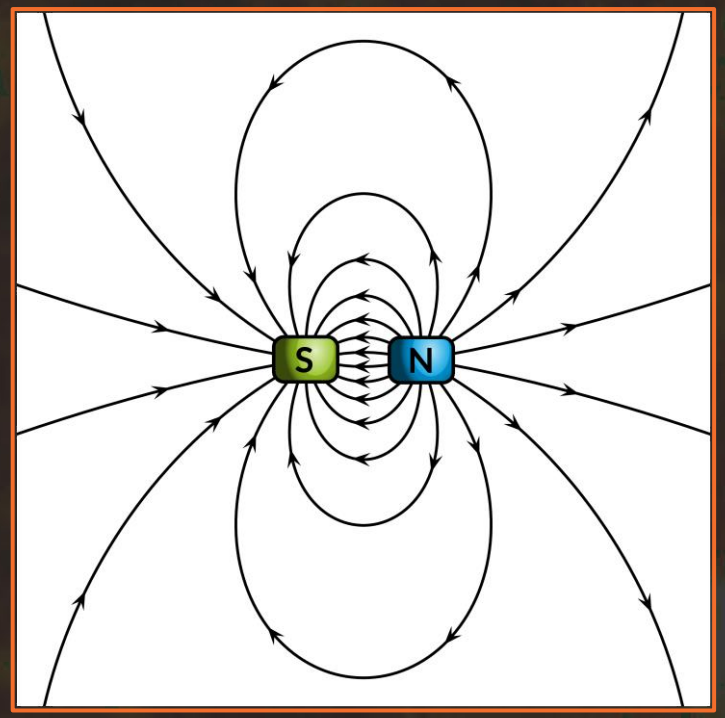
- Linee di campo elettrico
  - Immaginarie
  - Non si intersecano mai
  - Vicino = forte!
  - Da + a -



Campo magnetico

- Influenza della carica sull'ambiente circostante
- Campo forte vicino ai poli

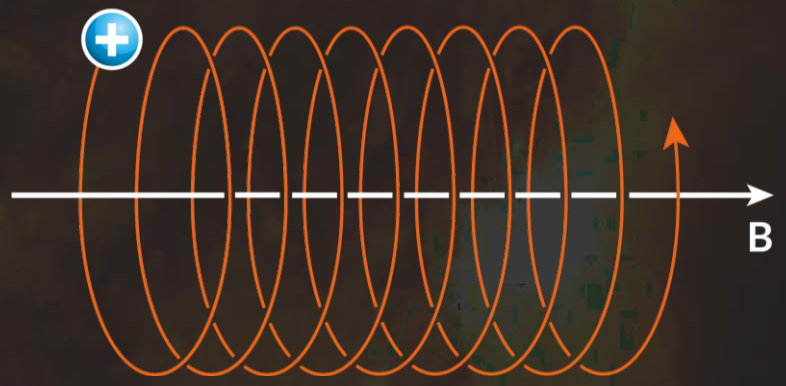
- Linee del campo magnetico
  - Immaginarie
  - Non si intersecano mai
  - Vicino = forte!
  - Da N a S
  - Linee sempre chiuse



Cariche in un campo magnetico

- Moto rotatorio
  - La carica interagisce con il campo magnetico
  - Movimento circolare attorno alla linea di campo

- Se la particella ha velocità nella direzione della linea di campo:
  - Traiettoria elicoidale attorno alla linea di campo



Confinamento del plasma

- Perché abbiamo bisogno di campi elettrici e magnetici nella fusione?

- Per confinare il plasma!
- Plasma → particelle ad alta temperatura e ad alta velocità

- Se le particelle raggiungono la parete del reattore, lo faranno sciogliere.
- Possiamo usare un campo magnetico per tenere le particelle lontane dalle pareti!

Esercitazione in aula 1.4

La direzione del campo magnetico (ovvero la direzione delle linee del campo magnetico) dipende dalla direzione delle cariche in movimento. Disegna la direzione del campo magnetico disegnando diverse linee del campo magnetico per le seguenti situazioni:

a) Un filo rettilineo attraversato da corrente.

b) Una spira circolare attraversata da una corrente in senso antiorario.

c) Un elettrone che si muove in moto circolare (in senso orario) e un protone che si muove in moto circolare (in senso antiorario). Confronta questo con le direzioni della domanda b: cosa noti?

d) Cosa puoi dire della direzione del campo magnetico rispetto alla direzione del moto in generale?

Esercizio in aula 1.4 – risposte

a) La corrente è uscente dal foglio. Il campo magnetico è orientato in senso antiorario.

b) Il campo magnetico all'interno della spira è uscente dal foglio. Il campo magnetico all'esterno della spira è entrante nel foglio.

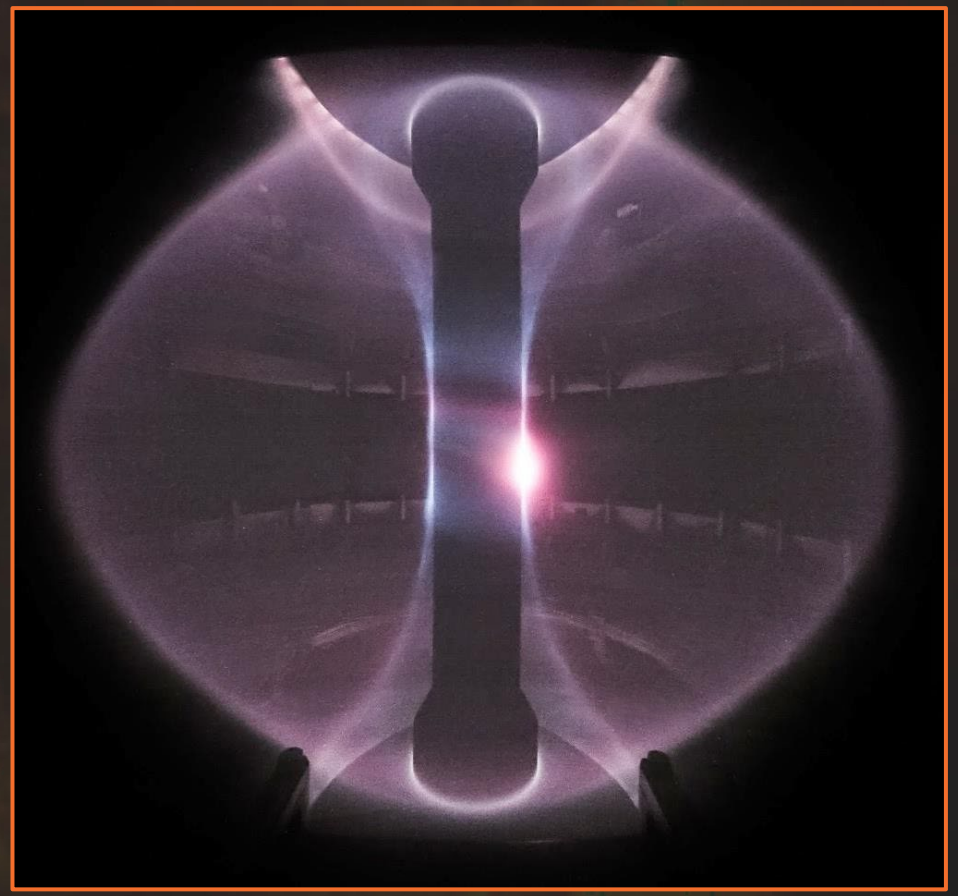
c) A causa della carica opposta e del moto opposto il campo magnetico ha la stessa direzione per entrambe le particelle

d)La direzione del campo magnetico è sempre perpendicolare alla direzione della corrente

1.4 Costruzione di un dispositivo di fusione

- Fusione a confinamento magnetico (MCF)
  1. Confinare un plasma con un campo magnetico
  2. Riscaldare il plasma alle condizioni di fusione

- Il tipo più noto di dispositivo di fusione:
- Tokamak
- Russo:
  "Camera toroidale con bobine magnetiche"



ALBERO (Tokamak sferico Mega Ampere) | Fonte: CCFE

Il tokamak

- Forma a ciambella (toro)
  - All'interno della ciambella : plasma
  - All'esterno della ciambella : bobine magnetiche
- Geometria
  - raggio maggiore R
  - raggio minore a
  - angolo poloidale θ
  - angolo toroidale φ

Fonte: immagine stock Powerpoint

Esercitazione in aula 1.5

Diversi tokamak e dispositivi di fusione toroidale hanno diversi "rapporti di aspetto": il rapporto tra il raggio maggiore R e il raggio minore a. Di conseguenza le forme di questi tori possono variare parecchio. Diamo un'occhiata più da vicino a queste diverse forme.

a) Fai uno schizzo di un toro con un raggio maggiore grande, ma con un raggio minore piccolo. Cosa sembra questo?

b) Ora fai uno schizzo di un toro con un piccolo raggio maggiore e un grande raggio minore. Perché è più difficile disegnare?

c) Cosa accadrebbe se rendessi il raggio maggiore sempre più piccolo mantenendo un raggio minore grande? Con che forma finisci?

Ora guarda le proporzioni dei due schizzi da (a) e (b). d) Cosa

succede se le proporzioni cambiano?

e) Qual è il “rapporto di aspetto” più piccolo possibile per un toro?

Esercizio in aula 1.5 – risposte

a) Una ciambella

b) La ciambella diventa più sferica, il raggio minore non può essere più grande del raggio maggiore (altrimenti non è più un toro!)

c) Se permettiamo al raggio minore di essere maggiore del raggio maggiore e prendiamo il caso limite otteniamo una sfera

d) Il toro cambia forma

e) Il raggio minore non può essere maggiore del raggio maggiore. Se sono uguali, l'aspect ratio è al minimo, quindi aspect ratio = 1.

Esercitazione in aula 1.6

Come abbiamo visto, ci sono due direzioni principali su un toro: la direzione "toroidale" e quella "poloidale". Queste possono creare confusione, quindi diamo un'occhiata più da vicino.

a) Disegnare uno schizzo delle due possibili sezioni trasversali di un toro.

b) Quale sezione è la sezione poloidale? Qual è la sezione toroidale? Cosa noti della direzione toroidale/poloidale e delle rispettive sezioni trasversali?

Esercizio in aula 1.6 – risposte

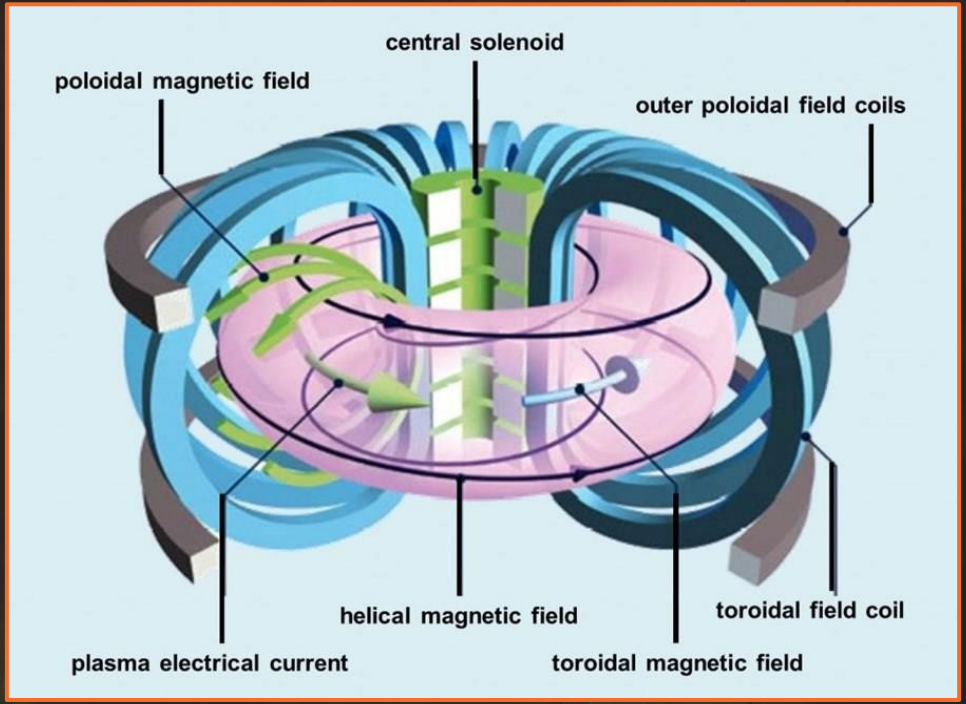
Poloidale sezione trasversale

Toroidale sezione trasversale

Bobine magnetiche di un tokamak

- Tre principali sistemi di magneti:

  - Bobine di campo toroidale
  - Solenoide centrale
  - Bobine di campo poloidali



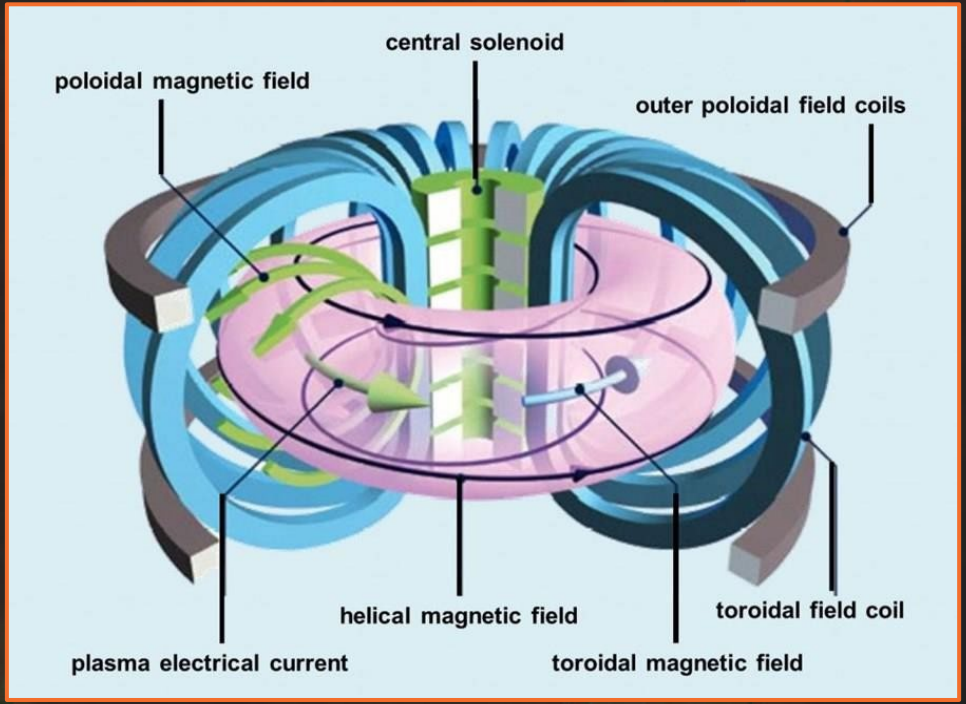
Credito: S.Li et al.https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Esercitazione in aula 1.7

Diamo un'occhiata a un tokamak standard, concentrandoci sui suoi tre principali sistemi magnetici.

a) Quali magneti si possono vedere giacere nella sezione trasversale poloidale? Come si chiamano questi magneti e ha senso questo nome?

b) Spiegare i nomi degli altri due gruppi di magneti.



Credito: S.Li et al.https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Esercizio in aula 1.7 – risposte

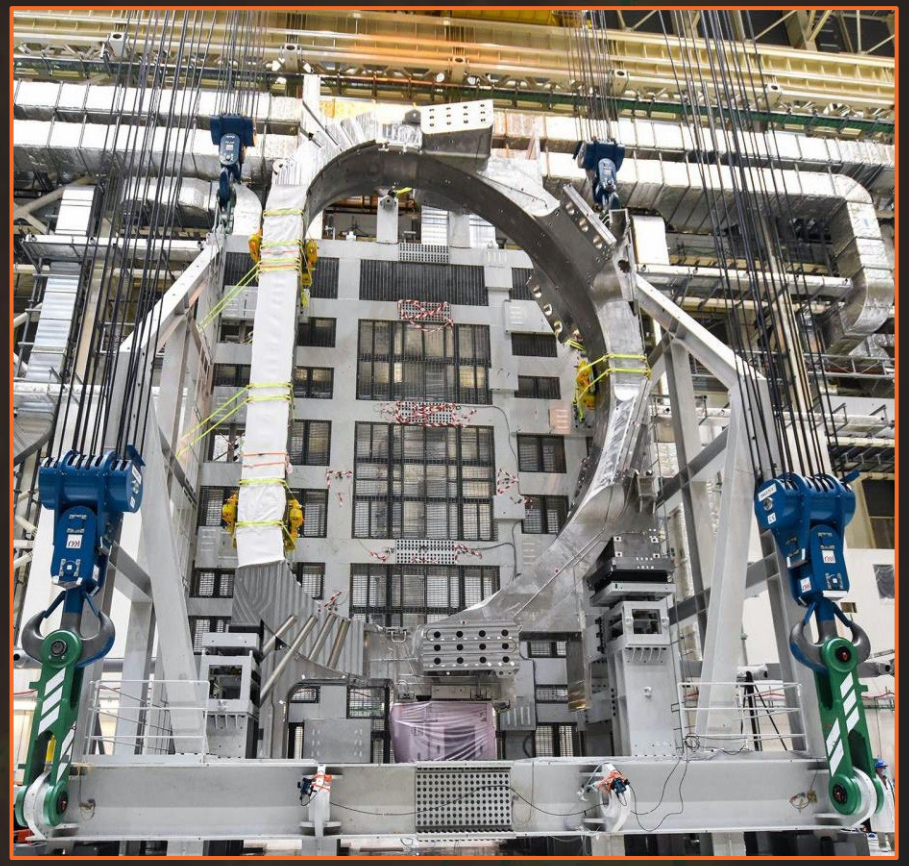
a. Bobine di campo toroidale– giacciono nella sezione poloidale del tokamak

b. Solenoide centrale– si trova nel buco della ciambella, cioè al centro
Bobine di campo poloidale– giacciono nella parte superiore e inferiore del toro

Bobine di campo toroidale

- Campo più forte del tokamak
- A forma di D
- Avvolto intorno alla ciambella

- Campi magnetici aggiuntivi necessari per un confinamento stabile



Credito: ITER

Solenoide centrale

- Set impilato di bobine situate nel foro della ciambella
- Campo utilizzato indirettamente:
  Per induzione elettromagnetica genera una corrente nel plasma
- Questa corrente crea un campo magnetico poloidale
- Campo toroidale + poloidale → campo magnetico elicoidale
- Campo elicoidale necessario per il confinamento stabile

Proprietà magnetiche

- Intensità del campo magnetico *B*
  - Una maggiore densità delle linee del campo magnetico porta a un valore più elevato di B

$$\Phi = B \bullet A\cos(\alpha)$$

- Flusso magnetico Φ
  - 'Phi'
  - Densità delle linee del campo magnetico attraverso una superficie
  - Le linee di campo sono perpendicolari alla superficie

Forza elettromotrice (FEM)

- Dipende dalla velocità di variazione del flusso magnetico
- Calcolato da:

Numero di spire della bobina × variazione del flusso magnetico

- EMF: ε (epsilon)

$$\varepsilon = N \bullet - \frac{d\Phi}{dT}$$

- Utilizzato dai trasformatori

FEM e induzione magnetica

FEM contrasta il cambiamento nel flusso magnetico

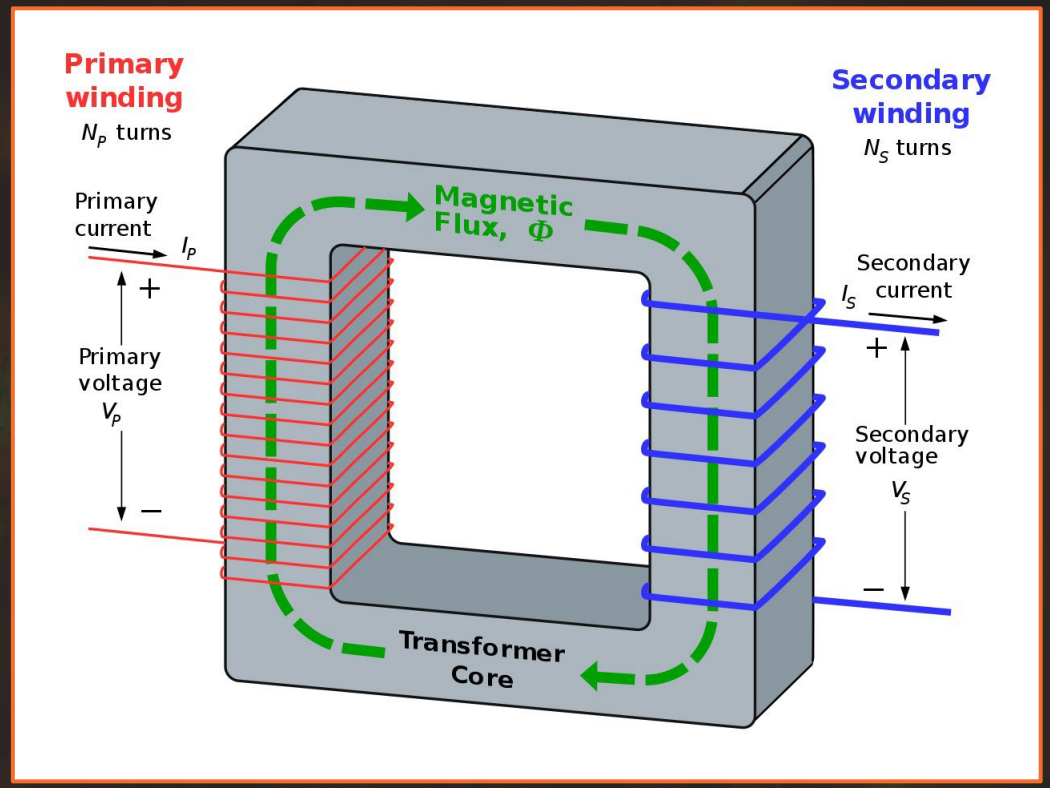
1. Si genera una tensione
2. La tensione genera una corrente
3. La corrente genera un campo magnetico opposto

Quindi un campo magnetico opposto è indotto dalla FEM: Induzione elettro-magnetica

In questo modo, la variazione della corrente attraverso un circuito può indurre una corrente in un altro circuito quando i circuiti non sono collegati!

Trasformatore

- Composto da due bobine
  - Bobina primaria
  - Bobina secondaria
  - Diverso numero di avvolgimenti
  - Usa l'induzione elettro-magnetica



- Trasformatore ideale
  - Nessuna perdita di potenza: $P_{bobina1} = P_{bobina2}$

Ricorda!

Potenza = Tensione × Corrente

$$P = V \times I$$

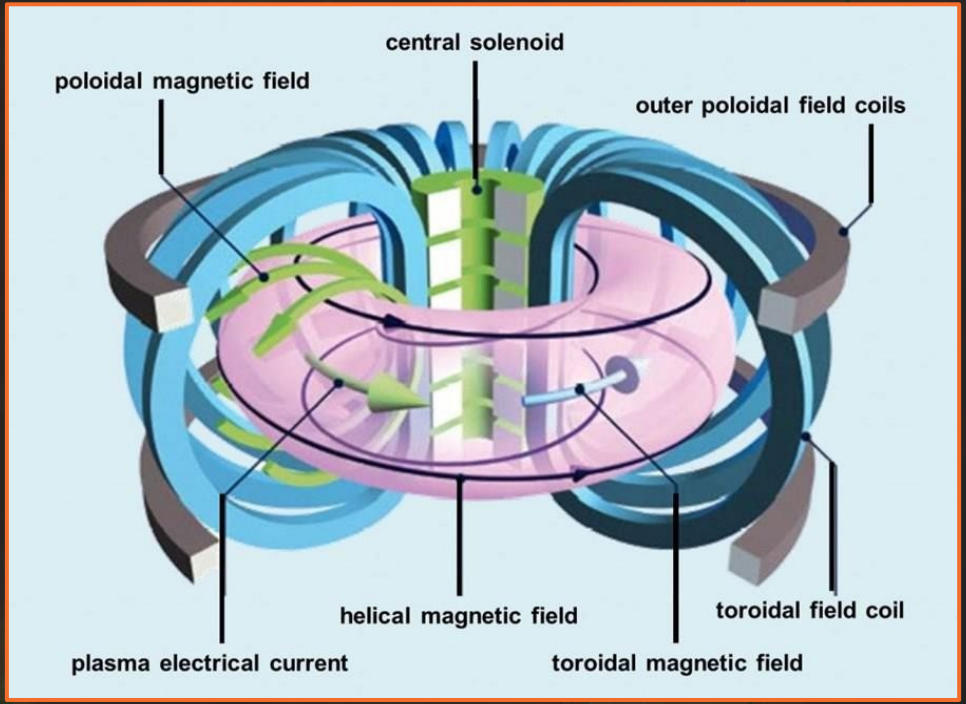
Credito: di BillC su Wikipedia in lingua inglese, CC BY-SA 3.0, https://tinyurl.com/ye55fpxv

Bobine di campo poloidale

- Aiuta a controllare la forma e la posizione del plasma
  - Necessario per mantenere stabile il plasma

- Quindi non utilizzato per creare un campo poloidale!

(Il solenoide centrale crea un campo poloidale attraverso l'induzione magnetica)



Credito: S.Li et al.https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Esercitazione in aula 1.8

L'uso dell'induzione per generare una corrente di plasma che crea il nostro campo poloidale ha un grosso svantaggio: rende un tokamak un dispositivo pulsato.

a) In che modo l'induzione magnetica porta al funzionamento a impulsi?

b) Perché questo è un problema per un reattore a fusione?

Esercizio in aula 1.8 – risposte

a) L'induzione dipende da una variazione del flusso magnetico. Il flusso magnetico non può continuare a cambiare continuamente, a un certo punto i magneti sono al loro limite.

   Quindi, il solenoide centrale funziona a impulsi, portando a un funzionamento a impulsi

b) Idealmente, un reattore a fusione funziona ininterrottamente. Se è pulsato, ci sono momenti in cui non viene generata energia

Confinamento magnetico

- Bilanciamento della pressione in tokamak
  - Pressione esterna: plasma
  - Pressione interna: campo magnetico
    → Forza Lorentz!
  - Equilibrio!
  - Consente la fusione sulla Terra!

Vuoi saperne di più sulla fusione?

Dai un'occhiata agli altri 4 moduli!

- Modulo 2: Verso la fusione
- Modulo 3: Controllo del plasma
- Modulo 4: Materiali di fusione
- Modulo 5: Distribuzione della Fusione

- Oppure guarda "Ulteriori letture" nel quaderno per studenti

This module has been written as part of the FuseNet educational materials for secondary school and can be found in the FuseNet educational materials browser: https://fusenet.eu/education/materials

For more information, see https://fusenet.eu

Created by: Sander Korteweg

Chief editors: Sjoukje Tijmensen-Hoekstra, Sander Korteweg

FuseNet

The European Fusion Education Network

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.